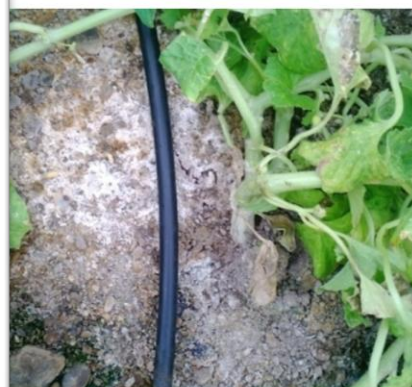


TESIS DOCTORAL

**OPTIMIZACIÓN DE LAS ESTRATEGIAS DE FERTIRRIGACIÓN DE
CULTIVOS HORTÍCOLAS EN INVERNADERO UTILIZANDO
AGUAS DE BAJA CALIDAD (AGUA SALINA Y AGUA
REGENERADA) EN CONDICIONES DEL
LITORAL DE ANDALUCÍA**



JUANA ISABEL CONTRERAS PARÍS

2014



Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera
CONSEJERÍA DE AGRICULTURA, PESCA Y DESARROLLO RURAL



UNIVERSIDAD DE ALMERÍA

Escuela Politécnica Superior y Facultad de Ciencias Experimentales

Departamento de Agronomía

Doctorado en Agricultura Protegida



MEE2011-0017

Optimización de las Estrategias de Fertirrigación de Cultivos Hortícolas en Invernadero Utilizando Aguas de Baja Calidad (Agua Salina y Agua Regenerada) en Condiciones del Litoral de Andalucía

Optimization of Fertigation Strategies in Horticultural Crops with Low
Quality Water (Brackish and Regenerated) under Greenhouse Conditions
of the Andalusia Coast

Tesis presentada para optar al Grado de
Doctor por la Universidad de Almería
Por **Juana Isabel Contreras París**

Directora:

Dra. María Luz Segura Pérez

Co-director:

Prof. Dr. José Miguel Guzmán Palomino

ALMERIA, 2014

A mis padres.

*Gracias por estar siempre ahí,
para todo y para todos.*

Agradecimientos

En primer lugar me gustaría agradecer a mi Directora de Tesis, la Dra. María Luz Segura, por elegirme para realizar este trabajo y ofrecerme la oportunidad de cumplir uno de mis sueños. Han sido unos años intensos en los que me ha transmitido su pasión por la investigación en el ámbito de la fertilización de los cultivos hortícolas y en los que me he sentido totalmente apoyada y querida. Gracias de todo corazón.

A mi Co-director, el Dr. José Miguel Guzmán, por sus sabios consejos y su inestimable ayuda en la finalización de esta Tesis.

A D. José Gabriel López Segura, ex-director del Centro IFAPA La Mojonera por haber confiado siempre en mí y hacer todo lo posible para que continuara siendo parte de este Centro.

A todos mis compañeros del Centro IFAPA La Mojonera-La Cañada, a los que están, y a los que estuvieron, por prestarme ayuda siempre que lo he necesitado y ha sido en muchas ocasiones, además de por acompañarme tantos años siempre con una sonrisa.

A D. Rafael Baeza por haberme acogido estos últimos años en su equipo e introducirme en el ámbito de la formación y transferencia consiguiendo despertar en mí nuevas inquietudes, y por acercarme a lo realmente importante de la investigación, su aplicación en el sector.

Un especial agradecimiento al sector privado agrícola, principalmente a las empresas Alboran Agrícola S.A. e Hydro Agri España S.A. (actual Yara Iberian, S.A.) por cofinanciar las líneas de trabajo que han permitido la realización de parte de esta Tesis, y por su compromiso en la mejora de la eficiencia del uso de los fertilizantes.

A D. José Antonio Pérez, presidente de la Comunidad de Regantes Cuatro Vegas, por su ayuda desinteresada ante cualquier circunstancia.

Por último, a mi familia, a mis padres, a mis hijos y a mi marido que me hacen sentir día tras día la mujer más afortunada del mundo y me llenan de ilusión para seguir adelante. Os quiero.

La presente Tesis se ha desarrollado en el marco de los siguientes proyectos de investigación:

- OPTIMIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS QUE INTERVIENEN EN LA PRODUCCIÓN Y LA CALIDAD EN EL CULTIVO DE JUDÍA”. Subproyecto 3. Entidad financiadora: Dirección General de Investigación y Formación Agraria (Consejería de Agricultura y Pesca. Junta de Andalucía) (PIA.12.01.3). Entidades participantes: CIFA Almería (IFAPA), Universidad de Almería. Duración, desde: 2000 hasta: 2002. Investigador responsable: María Luz Segura (IFAPA La Mojonera, Almería).
- OPTIMIZACIÓN DE LA FERTIRRIGACIÓN DE LOS CULTIVOS HORTÍCOLAS DE INVERNADERO. Contrato de colaboración entre Fundación para la Investigación Agraria en la Provincia de Almería (FIAPA), Alborán Agrícola S.A (Almería) e Hydro Agri España S.A. Empresa/Administración financiadora: Alborán Agrícola S.A (Almería) e Hydro Agri España S.A.. Entidades participantes: CIFA Almería (IFAPA), Alboran e Hydro Agri España S.A., Universidad de Almería. Duración, desde: 2002 hasta: 2005. Investigador responsable: María Luz Segura (IFAPA La Mojonera, Almería).
- FERTIRRIGACIÓN DE JUDÍA UTILIZANDO AGUA RESIDUAL DEPURADA Y DESINFECTADA CON OZONO. Empresa/Administración financiadora: Fundación para la Investigación Agraria de la Provincia de Almería, FIAPA (Ref.2000/14). Entidades participantes: CIFA Almería (IFAPA), Universidad de Almería y Cajamar (Almería). Duración, desde: 2003 hasta: 2004. Investigador responsable: María Luz Segura (IFAPA La Mojonera, Almería).
- UTILIZACIÓN DE AGUA RESIDUAL URBANA DESINFECTADA (ARUD) PARA LA FERTIRRIGACIÓN DEL CULTIVO DE PIMIENTO. Entidad financiadora: INIA (RTA2006-00032-00-00). Entidades participantes: Centro IFAPA La Mojonera. Almería, Dpto. Química Agrícola de la Universidad Autónoma de Madrid y Dpto. Microbiología de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Almería. Duración, desde: 2006 hasta: 2009. INIA (RTA2006-00032-00-00); IFAPA (Financiación complementaria según resolución de 18 de Abril de 2007). Investigador responsable: Maria Luz Segura (IFAPA La Mojonera, Almería).

PUBLICACIONES INCLUIDAS EN LA TESIS Y OTRAS APORTACIONES CIENTÍFICAS DERIVADAS DE ESTA TESIS DOCTORAL

Esta Tesis se ha presentado como un compendio de publicaciones, a continuación se detallan los artículos que la componen, así como las publicaciones que se han derivado directamente de la realización de esta Tesis Doctoral.

1. Artículos incluidos en la Tesis Doctoral

Segura M.L., **Contreras J.I.**, Salinas R., Lao M.T. 2009. Influence of Salinity and Fertilization Level on Greenhouse Tomato Yield and Quality. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 40: 485-497 (ISSN 0010-3624 print/1532-2416 online). Impact factor JCR: 0.397. Category: AGROMOMY, Journal Rank in Category: 58 of 78 (Q3).

Segura M.L., **Contreras J.I.**, Salinas R., Lao M.T. 2009. Influence of Salinity and Fertilization Level on the Nutrient Distribution in Tomato Plants Under a Polyethylene Greenhouse in the Mediterranean Area. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 40: 498-513 (ISSN 0010-3624 print/1532-2416 online). Impact factor: 0.397. Category: AGROMOMY, Journal Rank in Category: 58 of 78 (Q3).

Contreras J.I., Plaza B.M., Lao M.T., Segura M.L. 2012. Growth and Nutritional Response of Melon to Water Quality and Nitrogen Potassium Fertigation Levels under Greenhouse Mediterranean Conditions. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 43: 434-444 (ISSN 0010-3624 print/1532-2416 online). Impact factor: 0.420. Category: AGROMOMY, Journal Rank in Category: 58 of 78 (Q3).

Segura M.L., **Contreras J.I.**, Plaza B.M., Lao M.T. 2012. Assessment of the Nitrogen and Potassium Fertilizer in Green Bean Irrigated with Disinfected Urban Wastewater. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 43: 426-433 (ISSN 0010-3624 print/1532-2416 online). Impact factor: 0.420. Category: AGROMOMY, Journal Rank in Category: 58 of 78 (Q3).

Contreras J.I., Eymar E., Lopez J.G., Lao M.T., Segura M.L. 2013. Influences of Nitrogen and Potassium Fertigation on Nutrient Uptake, Production, and Quality of Pepper Irrigated with Disinfected Urban Wastewater. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 44:767-775 (ISSN 0010-3624 print/1532-2416 online). 5 Year Impact factor: 0.612. Category: AGROMOMY, Journal Rank in Category: 58 of 78 (Q3).

Contreras J.I., López J.G., Lao M.T., Eymar E., Segura M.L. 2013. Dry-Matter Allocation and Nutrient Uptake Dynamic in Pepper Plant Irrigated with Recycled Water by Different Nitrogen and Potassium Rate. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 44:758-766 (ISSN 0010-3624 print/1532-2416 online). 5 Year Impact factor: 0.612. Category: AGROMOMY, Journal Rank in Category: 58 of 78 (Q3).

2. Publicaciones derivadas de la Tesis Doctoral

Contreras J.I., Lao M.T., Segura M.L. 2014. Producción y absorción de macroelementos del cultivo de melón en invernadero bajo diferentes dosis NK y salinidad del agua. *Actas de Horticultura*, 66: 65-71.

Segura M.L., **Contreras J.I.** 2014. Efecto de la dosis NPK y salinidad del agua sobre los rendimientos y absorción de nutrientes del cultivo de tomate bajo invernadero. *Actas de Horticultura* 66:72-77.

Baeza R., **Contreras J.I.**, Eymar E., García-Delgado C., Moreno J., Suárez F., Segura M.L. 2013. Gestión sostenible de la reutilización de aguas residuales urbanas en cultivos hortícolas. XXXI Congreso Nacional de Riegos. Sinopsis de los Trabajos. P: 61-62. Orihuela (Alicante) 18-20 Junio de 2013.

Contreras J.I., Baeza R., Segura M.L. 2013. Calidad de las aguas residuales e importancia de los procesos de regeneración. En: Gestión sostenible de la reutilización de aguas residuales urbanas en los cultivos hortícolas. M.L. Segura, J.I. Contreras, M.M. Fernández (eds.). Pag. 5-42. IFAPA. Consejería de Agricultura y Medio Ambiente (Junta de Andalucía). DL.:AL 1135-2012.

Segura M.L., **Contreras J.I.**, Eymar, E. 2013. Manejo de la fertirrigación e influencia en el sistema suelo-agua-planta. En: Gestión sostenible de la reutilización de aguas residuales urbanas en los cultivos hortícolas. M.L. Segura, J.I. Contreras, M.M. Fernández (eds.). Pag.43-64. IFAPA. Consejería de Agricultura y Medio Ambiente (Junta de Andalucía). DL: AL 1135-2012.

Segura M.L., **Contreras J.I.**, García-Delgado C. 2012. Effect of NK level on the uptake and nutrient distribution in pepper plant under greenhouse in the mediterranean area. *Acta Horticulturae*, 927: 469-474.

Contreras J.I., López-Segura J.G., Eymar E., Segura, M.L. 2012. Influence of urban wastewater purified and NK fertilization on greenhouse pepper yield and quality. *Acta Horticulturae*, 927: 827-834.

García-Delgado C., Eymar E., **Contreras J.I.**, Segura M.L. 2012. Effects of fertigation with purified urban wastewater on soil and pepper plant (*Capsicum annuum* L.) production, fruit quality and pollutant contents. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 10 (1): 209-221.

Segura M.L. **Contreras J.I.**, Lao M.T. 2012. Influencia de la fertilización NK con agua regenerada sobre parámetros de producción de fruto y elementos disponibles del suelo en cultivo de pimiento bajo condiciones de clima Mediterráneo. *Actas de Horticultura*, 60: 825-829.

Contreras J.I., López J.G., Baeza R., Segura M.L. 2011. Efecto de la calidad del agua de riego y la fertilización NPK sobre producción y calidad del cultivo de tomate en invernadero. Boletín Trimestral de Información al Regante. Sistema de Asesoramiento al Regante, 17: 9-10.

Contreras J.I., López J.G., Suárez-Estrella F., Eymar E., Segura M.L. 2011. Fertirrigación NK de pimiento utilizando agua regenerada: I Efecto sobre la bioproductividad, calidad de fruto y extracción de nutrientes. XXIX Congreso Nacional de Riegos. Sinopsis de los Trabajos. P: 105-106. Córdoba (España) 7-9 Junio de 2011.

Contreras J.I., López J.G., Moreno J., Eymar E., Segura M.L. 2011. Fertirrigación NK de pimiento utilizando agua regenerada: II Efecto sobre la distribución de materia seca y nutrientes en la planta. XXIX Congreso Nacional de Riegos. Sinopsis de los Trabajos. P: 107-108. Córdoba (España) 7-9 Junio de 2011.

García-Delgado C., **Contreras J.I.**, Suárez-Estrella F., Segura M.L., Eymar E. 2010. Effect of disinfection systems on the content of inorganic and organic contaminants in urban wastewater. *Acta Horticulturae*, 852: 269-274.

Segura M.L., **Contreras J.I.**, García-Delgado C., Eymar E. 2010. Use of disinfected wastewater for pepper fertigation in Almería (Spain): Evaluation of chemical risks in soil and leachates. *Acta Horticulturae*, 852: 275-282.

Segura M.L., Martín E., Martínez S., **Contreras J.I.** 2009. Reutilización de agua residual para riego de judía: efecto de la carga fertilizante, microbiológica y de metales pesados. *Ingeniería del Agua*, 16 (1): 3-12.

Contreras J.I., Segura M.L., Pascual M.I., Catalá J.J. 2007. Effect of the NPK fertilization and irrigation water quality on the quality of tomato fruit. *Acta Horticulturae*, 747: 481-484.

Segura M. L., **Contreras J.I.**, Galindo P. 2007. Response of greenhouse tomato crop to NPK fertilization and quality of irrigation water. *Acta Horticulturae*, 747: 485-491.

Contreras J.I., López-Segura J.G., Galindo P., Catalá J.J., Segura M.L. 2007. Efecto de la fertirrigación NK y la calidad del agua de riego sobre la producción y extracciones nutricionales de melón en invernadero. *Actas de Horticultura*, 49: 93-99.

Contreras J.I., Segura M.L., Galindo P., Catalá J. 2006. Response of greenhouse pepper crop to fertilizer levels and different qualities of irrigation water. *Acta Horticulturae*, 700: 203-206.

Segura M.L., Granados M.R., **Contreras J.I.**, Martín E., Rodríguez J.M. 2006. Greenhouse management of the potassium fertilization of a green bean crop. *Acta Horticulturae*, 700: 145-148.

Segura M.L., Martín E., **Contreras J.I.** 2006. Reutilización de aguas residuales urbanas para la agricultura. *Horticultura* 196. Volumen: XXIV 7: 16-19.

Segura M. L., Martín E., **Contreras J.I.**, Pascual M. I., Granados M. R. 2005. Reutilización de agua residual para riego de judía verde: efecto de la fertilización NK. XXIII Congreso Nacional de Riegos. Sinopsis de los Trabajos. P: 88-90. Elche (Alicante) 14-16 de Junio de 2005.

Segura M.L., Granados M.R., **Contreras J.I.**, Martín E., Rodríguez J.M. 2004. Rational management of the potassium fertilization of a green bean crop. *Italus Hortus*, 11 (3): 26.

Contreras J.I., Galindo P., Catalá J.J., Segura M.L. 2004. Fertirrigación del cultivo de pimiento: Efecto de la salinidad del agua de riego. XXII Congreso Nacional de Riegos. Sinopsis de los Trabajos. P: 95-96. Logroño (España) 15-17 de Junio de 2004.

Contreras J.I., Segura M.L., Granados M.R., Martín E. 2003. Utilización de agua residual depurada en fertirrigación de cultivos hortícolas. *Fruticultura profesional*, 139: 126-129.

Segura M.L., Granados M.R., **Contreras J.I.** 2003. Utilización de agua residual depurada para riego de judía verde: estimación de la carga fertilizante y sus efectos sobre el cultivo y la fertilidad del suelo. XXI Congreso Nacional de Riegos. Sinopsis de los Trabajos. P: 87-88. Mérida, 6-8 de Mayo de 2003.

Segura M.L., **Contreras J.I.**, Granados M.R., Martín E. 2003. Utilización de agua residual depurada en fertirrigación de cultivos hortícolas. 1 Congreso Iberoamericano de Nutrición Vegetal. Nutri-Fitos 2003. Tomo 2 (126-129). Barcelona, 20-21 de Noviembre de 2003.

Abreviaturas empleadas

AAA	Agencia Andaluza del Agua
ABA	Acido Abscísico
AMA	Agencia de Medio Ambiente
AR	Agua Regenerada
BER	Blosson End Rot
BOE	Boletín Oficial del Estado
CAC	Compuestos de Amonio Cuaternario
CAP	Consejería de Agricultura y Pesca
CAPDR	Consejería de Agricultura Pesca y Medio Ambiente
CCAA	Comunidades Autónomas
CE	Conductividad Eléctrica
CE _{es}	CE del extracto saturado
CHSE	Confederación Hidrográfica del Sur
CIC	Capacidad de Intercambio Catiónico
CMA	Consejería de Medio Ambiente
CMAOT	Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio
CR	Comunidad de Regantes
DBO ₅	Demanda Bioquímica de Oxígeno
DGIEA	Dirección General de Investigación y Formación Agraria
DHCMA	Demarcación Hidrográfica de la Cuenca Mediterránea Andaluza
DPA	Diputación Provincial de Almería
DPV	Déficit de Presión de Vapor
DQO	Demanda Química de Oxígeno
EA	Eficiencia Agronómica
EB	Eficiencia de Biomasa
EDAR	Estación Depuradora de Agua Residual
EMA	Eficiencia Medio Ambiental
EP	Eficiencia Productiva
EPA	Environmental Protection Agency

ER	Eficiencia de Rendimiento
ET _c .	Evapotranspiración del cultivo
FAO	Food and Agriculture Organization
IGME	Instituto Geológico y Minero de España
ITGE	Instituto Tecnológico Geo-Minero de España
MAGRAMA	Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente
MARM	Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino
MS	Materia Seca
PHCS	Plan Hidrológico de la Cuenca Sur
PSI	Porcentaje de Sodio Intercambiable
RAS	Relación de Adsorción de Sodio
RD	Real Decreto
ROS	Especies Reactivas de Oxígeno
SDT	Sólidos Disueltos Totales
SRPHCS	Seguimiento y Revisión del Plan Hidrológico de la Cuenca Sur

INDICE ABREVIADO

RESUMEN	1
ABSTRACT	3
CAPITULO I. Introducción General	5
CAPITULO II. Revisión Bibliográfica	33
CAPITULO III. Hipótesis y Objetivos	105
CAPÍTULO VI. Growth and Nutritional Response of Melon to Water Quality and Nitrogen Potassium Fertigation Levels under Greenhouse Mediterranean Conditions	111
CAPÍTULO V. Influence of Salinity and Fertilization Level on Greenhouse Tomato Yield and Quality	125
CAPÍTULO VI. Influence of Salinity and Fertilization Level on the Nutrient Distribution in Tomato Plants under a Polyethylene Greenhouse in the Mediterranean Area	141
CAPÍTULO VII. Influences of Nitrogen and Potassium Fertigation on Nutrient Uptake, Production, and Quality of Pepper Irrigated with Disinfected Urban Wastewater	159
CAPÍTULO VIII. Dry-Matter Allocation and Nutrient Uptake Dynamic in Pepper Plant Irrigated with Recycled Water by Different Nitrogen and Potassium Rate	171
CAPÍTULO IX. Assessment of the Nitrogen and Potassium Fertilizer in Green Bean Irrigated with Disinfected Urban Wastewater	183
CAPÍTULO X. Discusión General	193
CAPÍTULO XI. Conclusiones Generales	231
BIBLIOGRAFÍA	235
ANEXO 1. Concentración de nutrientes en la planta	273
ANEXO 2. Eficiencia de uso de nutrientes	281

INDICE

RESUMEN	1
ABSTRACT	3
CAPITULO I. Introducción General	5
1.1. CONTEXTO EN EL QUE SE ENMARCA LA TESIS	7
1.2. SITUACIÓN ACTUAL DE LOS RECURSOS HÍDRICOS	12
1.2.1. Acuíferos ligados a la horticultura de Almería	12
1.2.1.1. <i>Campo de Dalías</i>	13
1.2.1.2. <i>Campo de Níjar y Bajo Andarax</i>	18
1.2.1.3. <i>Bajo Almanzora</i>	23
1.2.2. Agua regenerada en la horticultura de Almería	25
1.2.2.1. <i>Campo del Bajo Andarax</i>	27
CAPITULO II. Revisión Bibliográfica	33
2.1. FERTIRRIGACIÓN	35
2.1.1. La absorción de nutrientes como base de la fertirrigación	36
2.1.2. Fertirrigación en cultivos hortícolas	41
2.1.2.1. <i>Fertirrigación nitrogenada</i>	41
2.1.2.2. <i>Fertirrigación fosfórica</i>	44
2.1.2.3. <i>Fertirrigación potásica</i>	48
2.2. SALINIDAD	54
2.2.1. Interacción con el desarrollo de los cultivos	55
2.2.1.1. <i>Efecto osmótico</i>	57
2.2.1.2. <i>Efecto por ión específico</i>	58
2.2.2. Tolerancia a la salinidad	60
2.2.2.1. <i>Mecanismos que contribuyen a la tolerancia a la salinidad</i>	63
2.2.2.2. <i>Factores que afectan la tolerancia a la salinidad</i>	69
2.2.3. Absorción de nutrientes en condiciones salinas	77
2.2.3.1. <i>Nitrógeno</i>	77

2.2.3.2. <i>Fósforo</i>	79
2.2.3.3. <i>Potasio</i>	80
2.2.3.4. <i>Otros macronutrientes</i>	81
2.3. AGUA REGENERADA.....	84
2.3.1. Legislación Nacional	85
2.3.2. Calidad agronómica del agua regenerada	89
2.3.2.1. <i>Criterios de calidad del agua</i>	89
2.3.3. Uso de agua regenerada en la agricultura	95
2.3.3.1. <i>Efecto sobre el suelo</i>	96
2.3.3.2. <i>Efecto sobre la planta</i>	101
CAPITULO III. Hipótesis y Objetivos	105
3.1. HIPÓTESIS DE TRABAJO.....	107
3.2. OBJETIVOS	108
3.2.1. Objetivo general.....	108
3.2.2. Objetivos específicos	108
CAPÍTULO IV. Growth and Nutritional Response of Melon to Water Quality and Nitrogen Potassium Fertigation Levels under Greenhouse Mediterranean Conditions	111
Abstract	113
INTRODUCTION	113
MATERIALS AND METHODS	114
Plant Culture and Treatments	114
Preparation and Plant Analyses	115
Data Analysis.....	115
RESULTS AND DISCUSSION.....	116
Fruit Production	116
Dry Matter and Nutrient Total Uptake by Plant	118
CONCLUSIONS	121
ACKNOWLEDGMENTS	122
REFERENCES	122

CAPÍTULO V. Influence of Salinity and Fertilization Level on Greenhouse Tomato Yield and Quality	125
Abstract.....	127
INTRODUCTION	128
MATERIALS AND METHODS	129
Plant Culture and Treatments	129
Data Recorded	129
Data Analysis.....	131
RESULTS AND DISCUSSION.....	131
Fruit Production	131
Quality Parameters.....	134
CONCLUSIONS	137
ACKNOWLEDGMENTS	137
REFERENCES	137
 CAPÍTULO VI. Influence of Salinity and Fertilization Level on the Nutrient Distribution in Tomato Plants under a Polyethylene Greenhouse in the Mediterranean Area	 141
Abstract	143
INTRODUCTION	144
MATERIALS AND METHODS	145
Plant Culture and Treatments	145
Preparation and Plant Analyses	147
Data Analysis.....	148
RESULTS AND DISCUSSION.....	148
Nutrient and Sodium Total Uptake by Crop	148
Nutrients and Sodium Distribution by Plant.....	150
CONCLUSIONS	155
ACKNOWLEDGMENTS	156
REFERENCES	156

CAPÍTULO VII. Influences of Nitrogen and Potassium Fertigation on Nutrient Uptake, Production, and Quality of Pepper Irrigated with Disinfected Urban Wastewater	159
Abstract.....	161
INTRODUCTION.....	162
MATERIALS AND METHODS	162
Plant Culture and Treatments	162
Plant Analyses	163
Data Analysis.....	163
RESULTS AND DISCUSSION.....	163
Fruit Production	163
Quality Fruit Parameters.....	166
Total Nutrient Uptake by Pepper Crop	166
CONCLUSIONS	167
ACKNOWLEDGMENTS	168
REFERENCES	168
 CAPÍTULO VIII. Dry-Matter Allocation and Nutrient Uptake Dynamic in Pepper Plant Irrigated with Recycled Water by Different Nitrogen and Potassium Rate	 171
Abstract	173
INTRODUCTION	174
MATERIALS AND METHODS	174
Plant Culture and Treatments	174
Preparation and Plant Analyses	175
Data Analysis.....	175
RESULTS AND DISCUSSION.....	177
Dry Matter and Nutrient Total Uptake by Crop	177
Nutrient Distribution in the Plant	178
CONCLUSIONS	179
ACKNOWLEDGMENTS	180
REFERENCES	180

CAPÍTULO IX. Assessment of the Nitrogen and Potassium Fertilizer in Green Bean Irrigated with Disinfected Urban Wastewater	183
Abstract	185
INTRODUCTION	185
MATERIALS AND METHODS	186
RESULTS AND DISCUSSION.....	187
Soil Salinity	187
Fruit Production	188
Nutrient Concentrations in Leaf, Stem, and Fruit	188
Nutrient and Dry-Matter Total Uptake by Crop	188
Nutrient Efficiency	189
Nutrients and Dry-Matter Distribution by Plant	189
CONCLUSIONS	190
ACKNOWLEDGMENTS	191
REFERENCES	191
 CAPÍTULO X. Discusión General	 193
10.1. EFECTO DE LA FERTIRRIGACIÓN	195
10.1.1. Producción de fruto.....	195
10.1.2. Calidad de fruto	199
10.1.3. Producción de materia seca aérea de la planta.....	200
10.1.4. Absorción total de nutrientes y sodio por la parte aérea de la planta	201
10.1.5. Distribución de materia seca, nutrientes y sodio en la planta.....	204
10.1.6. Eficiencia de uso de nutrientes	207
10.1.6.1. Eficiencia agronómica	208
10.1.6.2. Eficiencia medio ambiental	209
10.1.6.3. Eficiencia de biomasa	211
10.1.6.4. Eficiencia de rendimiento	212
10.1.6.5. Eficiencia productiva	212
10.1.7. Salinidad del suelo	213
10.2. EFECTO DE LA CALIDAD DEL AGUA DE RIEGO	214

10.2.1. Producción de fruto.....	214
10.2.2. Calidad de fruto	217
10.2.3. Producción de materia seca aérea de la planta.....	219
10.2.4. Absorción total de nutrientes y sodio por la parte aérea de la planta	220
10.2.5. Distribución de materia seca, nutrientes y sodio en la planta.....	222
10.2.6. Eficiencia de uso de nutrientes	223
10.2.6.1. Eficiencia agronómica	223
10.2.6.2. Eficiencia medio ambiental	223
10.2.6.3. Eficiencia de biomasa	224
10.2.6.4. Eficiencia de rendimiento	224
10.2.6.5. Eficiencia productiva	224
10.3. INTERACCIÓN ENTRE FERTIRRIGACIÓN Y CALIDAD DEL AGUA.....	225
10.3.1. Producción de fruto.....	225
10.3.2. Calidad de fruto	225
10.3.3. Producción de materia seca aérea de la planta.....	226
10.3.4. Absorción total de nutrientes y sodio por la parte aérea de la planta	226
10.3.5. Distribución de materia seca, nutrientes y sodio en la planta.....	227
10.3.6. Eficiencia de nutrientes.....	227
10.4. DOSIS ÓPTIMAS DE NUTRIENTES EN FUNCIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA.....	227
10.4.1. Cultivo de melón.....	227
10.4.2. Cultivo de tomate.....	228
10.4.3. Cultivo de pimiento	229
10.4.4. Cultivo de judía verde.....	229
CAPÍTULO XI. Conclusiones Generales	231
BIBLIOGRAFÍA	235
ANEXO 1. Concentración de Nutrientes en la Planta	273
ANEXO 2. Eficiencia de Uso de Nutrientes	281

RESUMEN

La horticultura intensiva de la provincia de Almería se caracteriza por tener invernaderos con cubierta de plástico, sin control de clima, suelo enarenado y sistemas de fertirrigación de alta tecnología que permiten un control preciso de los aportes de agua y nutrientes. En la actualidad, la excesiva aplicación de fertilizantes a los cultivos no proporciona un incremento significativo en los rendimientos y lleva asociado un impacto ambiental negativo que se refleja en los niveles de nitratos presentes en los acuíferos de las zonas productoras y en las elevadas concentraciones de fosforo y potasio registradas en los suelos agrícolas. Debido a la sobreexplotación de los acuíferos de las zonas productoras, fuente principal de abastecimiento del sistema de producción, se ha originado un deterioro de la calidad del agua en términos de cantidad y calidad. El aumento de la salinidad de los acuíferos hace necesario producir con aguas salobres y buscar otras fuentes alternativas al agua subterránea, como son las aguas de origen residual urbano que sometidas a un proceso de regeneración aseguren una calidad óptima para su uso en riego de cultivos hortícolas de invernadero. En este contexto es primordial reducir los insumos de fertilizantes que se aplican a través de la fertirrigación, y por ende disminuir la salinidad de la disolución de fertirrigación y la contaminación medioambiental, planteando la siguiente hipótesis de trabajo: La optimización de las dosis de nutrientes en fertirrigación aumentará la eficiencia de uso de los nutrientes y permitirá la utilización de aguas de menor calidad agronómica (aguas salinas y regeneradas).

Para dar respuesta a la hipótesis, el objetivo general fue definir estrategias de fertirrigación más sostenibles, mediante el ajuste de las dosis de NK o NPK a aplicar y el uso de aguas salinas y regeneradas. El objetivo general se desarrolló estableciendo cuatro objetivos específicos: 1º) Efecto de la fertirrigación, 2º) Efecto de la calidad del agua, y 3º) Interacción de ambos factores sobre: la productividad, la nutrición de la planta y la eficiencia de uso de los nutrientes, así como sobre la salinidad del suelo. 4º) Optimización de las estrategias de fertirrigación estableciendo unas dosis de nutrientes óptimas en función de la calidad del agua y basadas en la respuesta productiva del cultivo y la eficiencia de uso de nutrientes. Para conseguir los objetivos se desarrollaron un total de cinco experimentos en invernadero con cubierta de plástico, clima pasivo, suelo enarenado y riego localizado en la provincia de Almería. Dos experimentos fueron realizados sobre cultivo de melón (Capítulo IV), y los otros sobre cultivo de tomate (Capítulos V, VI), pimiento (Capítulos VII, VIII) y judía verde (Capítulo IX) determinando los efectos sobre la producción y calidad del fruto, producción de materia

seca total de la planta, y extracción y distribución de nutrientes en los órganos aéreos de la planta. También se determinó el efecto de la dosis fertilizante sobre la salinidad del suelo, así como la eficiencia de uso de los nutrientes.

Los resultados mostraron que la concentración de nutrientes aplicada en fertirrigación influyó en la producción comercial de todos los cultivos. La producción aumentó con el incremento de las dosis NK o NPK aplicadas en los cultivos de melón, tomate y pimiento, sin embargo, en el cultivo de judía el aumento de la concentración de nutrientes originó un incremento de la salinidad del suelo que produjo un descenso en la producción comercial. El nivel de fertirrigación no tuvo influencia en la mayoría de los parámetros de calidad organoléptica de los frutos, solo afectó la dureza y acidez del fruto de tomate, aumentándolas con las dosis de NPK más elevadas. La absorción de nutrientes realizada por la planta estuvo influenciada por el nivel de fertilización, siguiendo un patrón similar a la producción de fruto y alcanzando un valor umbral a partir del cual un incremento de la dosis NK no generó una mayor absorción de nutrientes. En todos los cultivos, la eficiencia de uso de nutrientes disminuyó con el mayor nivel de nutrientes aplicado. En lo que respecta a la calidad de las aguas utilizadas, el agua salina no afectó la producción comercial de melón y tomate, si bien redujo el tamaño del fruto de melón y mejoró la calidad organoléptica del fruto de tomate con respecto al agua de menor salinidad. La salinidad del agua de riego aumentó la absorción de N en los cultivos de melón y tomate, incrementando también la absorción de K en el cultivo de tomate. En ambos cultivos, la relación de absorción N/K incrementó con el agua de mayor salinidad. El uso de agua regenerada no afectó la calidad de los frutos de pimiento.

Las conclusiones generales obtenidas fueron: 1) Los experimentos desarrollados han permitido establecer unas dosis óptimas de aplicación de NK o NPK para los cultivos de melón, tomate, pimiento y judía verde en condiciones de invernadero y suelo enarenado del sureste español, considerando la productividad y la eficiencia en el uso de los nutrientes, tanto para aguas de buena calidad como aguas de mayor salinidad. 2) La utilización de aguas salobres ($2,2\text{--}2,6\text{ dSm}^{-1}$) es una opción viable para la fertirrigación de los cultivos de melón y tomate, ya que no reduce la productividad y aumenta la calidad organoléptica de los frutos y la eficiencia de uso de los nutrientes. 3) El empleo de agua regenerada es una estrategia sostenible para la producción de cultivos hortícolas de invernadero que permite reducir o eliminar, dependiendo del cultivo, el uso de fertilizantes comerciales.

ABSTRACT

The intensive horticulture in Almeria is characterized by produce in plastic greenhouses with sanded soil, without climate control, but with fertigation of high-tech systems that enable precise control of fertilizers and irrigation water. Currently, the excessive use of fertilizers does not provide a significant increase in yields, which however is associated with a negative environmental impact. High levels of nitrates present in the aquifer, as well as high concentrations of phosphorus and potassium in agricultural soils, are indicative of this impact. The main source of this production system is ground water. The high level of intensification has led to over exploitation of aquifers and a deterioration both in the quantity and quality of water used for irrigation. Increasing salinity has led to the brackish water use and to seek alternative sources of water for crops. Adequately regenerated to ensure optimum quality, urban waste water can be an alternative source for irrigation of horticultural crops in greenhouse. In this context and in order to minimize both environmental pollution and reduce levels of salinization of ground waters, the following working hypothesis was proposed: Optimizing the dose of nutrients applied in fertigation, can be increased nutrient use efficiency, which will allow the use of low quality agricultural water (salinity and recycled water).

To address the hypothesis, the general objective was to define more sustainable fertigation strategies, by adjusting the dose of applied nutrients along using salinity and reclaimed water. To develop the overall objective four specific objectives were set: 1) Effect of fertigation factor on crop. 2) Effect of water quality on crop. 3) Interaction of both factors on crop productivity, nutrients use efficiency, and soil salinity. 4) Optimizing fertigation strategies, through the establishment of optimal doses of nutrients, depending on water quality, productivity and nutrient use efficiency of crop. To achieve the objectives, a total of five experiments were performed in the Almería province under plastic greenhouse, with sandblasted soil, drip irrigation system and passive climate control. In each experiment, the effects of factors on production of aerial dry matter, absorption and distribution of nutrient in organs, harvest and fruit quality, were analyzed in crops of melon (Chapter IV), tomato (Chapters V and VI), pepper (Chapters VII and VIII) and green bean (Chapter IX). In addition, the effect of fertilizers doses on nutrient use efficiency and soil salinity were evaluated.

Results shows that levels of applied fertilizer on fertigation solutions, influence the commercial production of all crops. An increase in commercial production with higher NK-doses for melon, tomato, and pepper crops was observed, while on green bean plants, higher fertigation concentration originate an increase in soil salinity and a drop in commercial production. On the contrary, fertilizer doses on fertigation have no influence on the organoleptic quality of the fruits. Depending on fertilizer doses on fertigation solution, nutrient absorption follows a similar pattern of fruit production, reaching a limiting value, in which an increase in the NK fertigation doses does not increase absorption by aerial part of the plant, which leads to a decrease in the nutrient use efficiency for highest fertigation levels on all crops. The use of brackish water, does not affect the commercial production of melon and tomato, but reduces the average size of the fruits of melon, while increasing the organoleptic quality of tomato fruits. The uptake of N by melon and tomato crops increases with salinity of irrigation water. Only an increase in the absorption of K is observed in the tomato crop. In both crops, the ratio of absorption N/K increases with increasing salinity in irrigation water. The use of reclaimed water does not affect the quality of pepper fruits.

The general conclusions reached were: The experiments have established some optimal application rate of NPK or NK for melon, tomato, peppers and green beans crops, considering the productivity and nutrient use efficiency, both for good quality as for brackish. The use of high salinity water ($2.2\text{--}2.6\text{ dS m}^{-1}$) is a viable option for fertigation of tomato and melon crops, since it does not reduce the productivity and increases the organoleptic quality of the fruits and nutrient use efficiency. The use of reclaimed water is a sustainable strategy for the production of horticultural crops in greenhouse that allows reducing or eliminating, depending on the crop, the use of commercial fertilizers.

CAPITULO I

Introducción General

1.1. CONTEXTO EN EL QUE SE ENMARCA LA TESIS

La producción hortícola intensiva desarrollada en el sureste peninsular es una de las principales fuentes sobre las que se asienta la economía de la provincia de Almería. Desarrollada fundamentalmente en la zona litoral, existe actualmente una superficie invernada de 29035 hectáreas (CAPDR, 2014) las cuales se distribuyen entre la comarca del Campo de Dalías (20751 hectáreas), la comarca del Campo de Níjar y Bajo Andarax (7651 hectáreas) y la comarca del Bajo Almanzora (632 hectáreas).

La horticultura intensiva de la provincia de Almería, es relativamente reciente (el primer invernadero se construyó en 1963) y se caracteriza por tener invernaderos con cubierta de plástico y clima pasivo. Tres de los factores que han permitido su asentamiento y rápido desarrollo son: las características climatológicas de esta zona, la existencia de importantes fuentes hídricas de origen subterráneo y la implantación de enarenados. Junto a estos factores, la continua incorporación de innovaciones tecnológicas han mejorado el sistema y han permitido obtener producciones de alta rentabilidad.

En lo que se refiere a la eficiencia del agua, la incorporación del riego por goteo al sistema hortícola también ha contribuido a una mejora de la producción al permitir el uso de aguas con elevada concentración de sales y la aplicación de los fertilizantes disueltos en el agua de riego (fertirrigación) durante el ciclo de cultivo. Actualmente, el empleo generalizado de sistemas de riego localizado (99,9% de la superficie según Céspedes et al., 2009), con instalaciones de fertirriego de alta tecnología, permiten controlar con precisión los fertilizantes aplicados. La incorporación de esta tecnología ha generado una modificación de las pautas de trabajo en lo que a la fertilización se refiere, desapareciendo casi por completo el empleo de abonados de fondo (Lao y Jiménez, 2002; Martínez-Gaitán, 2004; Thompson et al., 2007).

Un estudio reciente, aunando criterios económicos, medioambientales y sociales (Galdeano-Gómez et al., 2013) propugna que el modelo de agricultura intensiva desarrollado en Almería es uno de los más sostenible a nivel mundial. En lo que respecta a los criterios medioambientales, resaltan una utilización eficiente de los recursos y un bajo impacto en términos de huella ecológica, especialmente la huella hídrica. Se incluyen además aspectos como el efecto albedo generado por los

invernaderos para la reducción del calentamiento global y el referente de prácticas integradas. Para estos autores, el impacto ecológico sobre determinados recursos, resulta unas 20 veces inferior a la media agrícola nacional. La adecuada aplicación de tecnologías avalan su eco-eficiencia en uso de agua, destacando la capacidad de exportación de recursos hídricos en forma de frutas y hortalizas. Por otro lado, resulta evidente el importante papel que juega el sector productivo de la provincia de Almería en el abastecimiento de hortalizas tanto a nivel nacional como europeo, por su capacidad (al producir para 53 millones de personas) y seguridad alimentaria.

A pesar de esta defensa de la sostenibilidad del sistema de producción, es indudable que este ha llevado asociado un importante efecto sobre el medioambiente, que podría resumirse en dos puntos en lo que respecta al uso del agua y los fertilizantes:

a) La principal fuente hídrica de abastecimiento es de origen subterráneo, la limitación de este recurso y el elevado consumo ha generado a lo largo de los años una sobre-explotación de los acuíferos, produciéndose problemas de intrusión marina y una salinización de las fuentes hídricas tanto en las zonas litorales como en las zonas interiores (AMA, 1991; DGIEA, 1991; IGME, 2003; CMAOT, 2012). Actualmente, para paliar los problemas de sequía y contaminación, es necesario promulgar un aprovechamiento y una ordenación integral de los recursos disponibles, considerando los denominados “recursos no convencionales”, entre los que se encuentran las aguas regeneradas, como uno de los factores más relevantes para obtener un desarrollo sostenible. El uso de aguas residuales depuradas es un recurso muy importante para la agricultura, a la que se le atribuyen las siguientes ventajas:

- Proporciona disponibilidad constante y segura de agua no dependiente de épocas de sequías o variaciones de caudal y a un precio estable (Palacios et al., 1999; Cohen, 2003).
- Mejora la fertilidad del suelo (García, 1997; Shahalam et al., 1998).
- Incrementa la materia orgánica en el suelo (Zamora et al., 2008).
- Pueden generar un ahorro importante de fertilizantes debido a que contiene N, P, K, y oligoelementos (Bouwer y Idelovitch, 1987; Pérez et al., 1988; Ramos, 1997; Ivorra et al., 1997; Segura et al., 2001; Cohen, 2003; Segura et al., 2012).

- Proporciona mayores producciones en determinados cultivos (Buran et al., 1987; Pérez et al., 1988; Ramos et al., 1989).
- Ejerce una cierta protección del medio ambiente (Xu et al., 2002; Anderson, 2003), ya que minimiza la contaminación, elimina riesgos para la salud (Brenner et al., 2000) y reduce los vertidos al medio natural.
- Rentabiliza las inversiones realizadas en la depuración de aguas urbanas, contribuyendo a la obtención del equilibrio hídrico estable, a la regeneración de zonas húmedas y al aporte agua en aquellas zonas afectadas por sequías. En algunos casos, es el recurso que resulta más económico para su uso en riego.

El agua regenerada se utiliza, en la actualidad, como principal fuente de riego de unas 2500 ha de invernadero situados en el Bajo Andarax, y próximamente está prevista la reutilización de gran parte de las aguas residuales depuradas del Campo de Dalías.

b) En cuanto al uso de fertilizantes minerales, el exceso en la aplicación de fertilizantes nitrogenados en las áreas en las que se desarrollan los cultivos intensivos ha sido una de las causas que ha provocado el estado actual de las aguas subterráneas sobre las que se asienta la horticultura intensiva de Almería, estando designadas como “zonas vulnerables a la contaminación por nitratos” según el Decreto 36/2008, de 5 de febrero, por el que se designan las zonas vulnerables y se establecen medidas contra la contaminación por nitratos de origen agrario. Los elevados aportes de fertilizantes no son aprovechados en su totalidad por la planta y en el caso del nitrógeno, en forma de NO_3^- , es arrastrado por las aguas de infiltración a los acuíferos (AMA, 1991; Thompson et al., 2002). Por otra parte, la alta fijación de fósforo y potasio detectada en los suelos agrícolas (Gil et al., 2003) también pone de manifiesto el mal uso de las prácticas de fertilización, en lo que a estos nutrientes se refiere. Aunque la retención de estos elementos en el suelo evita su lixiviación, la acumulación progresiva puede producir, en el tiempo, un efecto negativo sobre la absorción de otros nutrientes y una reducción de la eficiencia de uso de los fertilizantes.

La situación descrita de niveles elevados de nutrientes tanto en aguas subterráneas como en suelos agrícolas demuestra que, independientemente de que los cultivos hortícolas sean exigentes en nutrientes, las estrategias de fertilización aplicadas hacen un uso poco eficiente de los fertilizantes y que es necesario un cambio radical en

la gestión de la fertirrigación de estos cultivos hacia estrategias que consideren las necesidades nutritivas de los mismos y que aseguren unos rendimientos óptimos con el menor impacto ambiental posible (Rincón, 2002; Pomares et al., 2002; Segura et al., 2012).

Los programas de fertilización desarrollados en la actualidad están basados fundamentalmente en disoluciones nutritivas equilibradas iónicamente, adaptadas de los cultivos hidropónicos y que son establecidas por el técnico asesor (Thompson et al., 2007). Con lo cual, las cantidades de nutrientes aplicadas al cultivo están directamente relacionadas con el volumen de agua aplicado. El cambio de los fundamentos de la fertirrigación, hacia estrategias que se basen en las extracciones realizadas por el cultivo conseguirán una optimización en el uso de los nutrientes que conllevará:

- Un ahorro económico en los costes de explotación.
- Una mejora de la producción agrícola.

A parte de los beneficios económicos mencionados, cabe destacar los beneficios de carácter medioambiental, como consecuencia del uso racional de los fertilizantes. Si se potencia el ahorro de los mismos se estará disminuyendo la contaminación ocasionada por las industrias de fabricación de los fertilizantes y se evitará también la contaminación de las aguas subterráneas y superficiales motivadas por las pérdidas de nutrientes en los sistemas de cultivo, principalmente asociada a los elevados aportes de fertilizantes nitrogenados y fosfóricos (IGME, 1982; AMA, 1991; Pulido-Bosch, 1997; Gil et al., 2003; IGME, 2003; CMAOT, 2012).

Diversas son las líneas de investigación que se han llevado a cabo para conseguir una gestión más eficiente de los nutrientes en este área de producción, centrándose fundamentalmente en optimizar los aportes de nitrógeno debido al problema anteriormente mencionado. Una de estas líneas se basa en minimizar las pérdidas de nitratos por lixiviación mediante el control del nivel de nitratos en la solución del suelo obtenida mediante sondas de succión. En este sentido, Granados (2011) y Granados et al. (2013) determinaron valores óptimos de NO_3^- en la solución del suelo para cultivos hortícolas de invernadero en suelo enarenado de Almería, estableciendo un rango óptimo de 8-12 mM para pimiento y de 12-14 mM para tomate y demostrando ser efectivo para reducir la pérdidas de nitrato por lixiviación (Thompson et al., 2009).

Trabajos posteriores demuestran que este rango puede reducirse a 3-7 mM para pimiento y a 7-10 mM para tomate sin registrar descensos en la producción (Fernández et al., 2012).

El desarrollo y adaptación de distintos modelos de simulación de requerimientos de nitrógeno como EU-Rotate N (Soto et al., 2014) o VegSyst (Giménez et al., 2013; Gallardo et al., 2014) también está siendo abordado. Este último (VegSyst) parece dar muy buenos resultados, obteniéndose una simulación muy precisa de la producción diaria de materia seca, absorción de N y ET_c. Gallardo et al. (2014) han desarrollado un prototipo para apoyo a la toma de decisiones (VegSyst-DDS) basado en VegSyst que calcula las necesidades de riego y N diarias determinando la concentración de N a aplicar en fertirrigación para cultivo de tomate. Si bien las necesidades de N están basadas en la absorción de N por el cultivo (considerando además el contenido en N mineral del suelo, el N mineralizado a partir de estiércol y materia orgánica del suelo y la eficiencia de cada fuente de N). En definitiva, la bondad del modelo está totalmente relacionada con los valores de extracciones de nutrientes introducidas en el mismo, con lo cual es necesario alimentar el modelo con datos de extracciones de nutrientes en las condiciones de Almería. La aplicación de las recomendaciones basadas en VegSyst produce una reducción en el aporte de fertilizantes nitrogenados del 34-65% con respecto a las prácticas convencionales realizadas por los agricultores.

La línea de determinación de extracciones de nutrientes realizadas por los cultivos hortícolas intensivos, en las condiciones de Almería, ha sido abordada por nuestro grupo de investigación, obteniendo, las extracciones realizadas por los principales cultivos hortícolas desarrollados en la provincia para cada estadio de desarrollo (Segura et al., 2012; Contreras et al., 2013b; Contreras et al., 2014a; Segura y Contreras, 2014).

Por otra parte, Thompson et al. (2013) y Padilla et al. (2014) evalúan la utilización de sensores ópticos para la determinación del contenido de nitrógeno en los cultivos, un método no destructivo que está obteniendo resultados aceptables.

1.2. SITUACIÓN ACTUAL DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

España es un país de fuertes contrastes geográficos y climáticos que condicionan la distribución y disponibilidad de los recursos hídricos naturales. Existe un acusado gradiente entre las áreas con abundantes recursos hídricos del norte y noroeste y las áreas secas del sur y del este.

El Sector Mediterráneo está constituido por cuencas pequeñas y medias vertientes al mar. La escasez e irregularidad de los recursos no se compensa con las aportaciones fluviales. La escasez natural de agua se incrementa hacia el sur, alcanzando sus valores máximos en las áreas litorales de Murcia y Almería (zona en la que se desarrolla esta Tesis). Por otra parte, esta situación de escasez se ve agravada periódicamente por fenómenos recurrentes de sequía, que no hacen sino extremar la necesidad de adoptar medidas para combatir sus efectos y mitigar sus consecuencias (MAGRAMA, 2010).

El área Mediterránea se caracteriza por tener un bajo nivel e irregularidad estacional y espacial de los recursos hídricos, y se incluye en el 60% de la población mundial con recursos naturales renovables de menos de $1000 \text{ m}^3 \text{ agua habitante}^{-1} \text{ año}^{-1}$, y donde el regadío consume más del 50% del total de los recursos hídricos naturales disponibles. A esto, hay que unirle el previsible efecto del cambio climático que es un factor importante a tener en cuenta.

Los primeros estudios estiman unas disminuciones para el año 2027 entre 2 y 11% en las aportaciones medias de las cuencas españolas, incidiendo más negativamente en las ya de por sí regiones más vulnerables (MAGRAMA, 2010).

1.2.1. Acuíferos ligados a la horticultura de Almería

Los acuíferos asociados a las zonas de producción hortícola de la provincia de Almería, proporcionan aproximadamente el 80% del agua empleada en los invernaderos de Almería (Reca et al., 1999). Como se ha comentado anteriormente, las tres comarcas productoras donde se desarrolla la horticultura intensiva de Almería son Campo de Dalías, Campo de Níjar-Bajo Andarax y Bajo Almanzora, la situación de los acuíferos de cada una de las zonas se indica a continuación.

1.2.1.1. Campo de Dalías

El Campo de Dalías es un claro exponente de captaciones profundas de agua subterránea con problemas en su diseño final, dando lugar a la interconexión entre tramos de acuíferos y facilitando la contaminación de acuíferos carbonatados infrayacentes de mejor calidad. La innovación tecnológica ha permitido el desarrollo de una agricultura intensiva bajo plástico en el área, que ha provocado una explotación intensiva de los recursos hídricos de los acuíferos del sector. En el área se diferencian tres unidades hidrogeológicas (Pulido-Bosch et al., 1988, 1989, 1992; ITGE, 1989, 1995): Balerna-Las Marinas, Balanegra y Aguadulce, siendo la Sierra de Gádor la principal fuente de alimentación de las mismas. Han sido ampliamente estudiadas (Pulido-Bosch et al., 1997; IGME, 2003; CMAOT, 2012) debido a la importancia económica y social del área que sustentan.

En la actualidad, la demanda total de agua supera los $198 \text{ hm}^3 \text{ año}^{-1}$, cantidad que se obtiene prácticamente en su totalidad de los acuíferos (AAA, 2009a). Datos recientes registran una extracción del acuífero de Campo de Dalías-Sierra de Gádor de $150 \text{ hm}^3 \text{ año}^{-1}$. De los cuales $114 \text{ hm}^3 \text{ año}^{-1}$ son destinados a la agricultura. Es decir, entre los principales usos del agua subterránea del Campo de Dalías según actividades y sectores, la agricultura es la más importante (76%). Es de destacar que la productividad del agua obtenida en los cultivos de la zona es cinco veces superior a la media nacional (Pulido-Bosch et al., 1997; IGME, 2003; CMAOT, 2012).

Por su disposición en llanura, en esta comarca se distinguen los acuíferos inferiores y los acuíferos de cobertera o superiores albergados en materiales porosos más recientes. Estos acuíferos están separados por una capa de materiales impermeables (launas o filitas, etc.), aunque existen algunos puntos de conexión entre ellos. Al principio, la mayor parte de las extracciones se captaban de los acuíferos de cobertera, pero debido al deterioro de la calidad por intrusión marina asociada a la sobreexplotación, el bombeo en los acuíferos inferiores ha venido creciendo hasta situarse en un 85% del total de las aguas subterráneas extraídas en la zona (AAA, 2009a).

El uso de estos acuíferos, incluyendo en este uso tanto el bombeo como aquellas actividades humanas practicadas sobre el terreno que les afectan, entre las que se

incluyen la extracción de tierra para utilizarla en la construcción de suelos enarenados, han producido consecuencias, en la cantidad y en la calidad del agua de los mismos, que se vienen registrando desde los años sesenta (AAA, 2009a). Un claro ejemplo, es la Balsa del Sapo que en realidad era un fondo de explotación de arcillas de donde se extraían finos para los suelos de los invernaderos, comenzaron a aparecer fenómenos de inundación a principios de los noventa, en la actualidad hay varios humedales, algunos de ellos de más de 1 km² de superficie, que ya han sumergido numerosos invernaderos (Pulido-Bosch et al., 2012).

a) **Explotación**

Las subidas piezométricas en el Acuífero Superior Central, en el que están prohibidas desde hace años las extracciones, no cambian el diagnóstico de sobreexplotación generalizada de esta masa de agua. En los últimos años el volumen sobreexplotado está próximo a los 64 hm³. Sin embargo, los niveles de los acuíferos inferiores han bajado casi continuamente, debido al aumento de los bombeos, con pequeñas recuperaciones parciales en los años más húmedos, alcanzando cotas piezométricas inferiores a -35 m sobre el nivel del mar (IGME, 2003).

La tendencia descendente prácticamente generalizada de los recursos es clara, presentando algunos puntos descensos medios anuales de más de 1,5 m año⁻¹ (en el periodo comprendido entre 2001 y 2008) y alcanzando en un punto concreto, un descenso del nivel piezométrico de más de 10 m en tres años (mayo de 2005 a abril de 2008). Este es, posiblemente, el caso más evidente del mal estado cuantitativo de la masa de agua subterránea (CMAOT, 2012).

Estas variaciones del nivel tienen unas repercusiones importantes en la relación de flujos del agua subterránea, que siempre circulará desde las zonas o acuíferos con mayor nivel (considerando la cota del agua) a las de nivel más bajo. Las tendencias bien contrastadas del nivel en los dos grupos de acuíferos han venido originando, entre otros cambios, la inversión del flujo primitivo de descarga de los inferiores a los de cobertera a lo largo del frente de contacto entre ellos, próximo al borde de la Sierra. Actualmente los flujos subterráneos se dirigen desde los acuíferos de cobertera a los acuíferos inferiores. En los extremos del Campo esta inversión del flujo subterráneo ha supuesto,

indirectamente, la entrada de mezclas con agua de mar y también la intrusión marina directa por la zona de Aguadulce.

b) Calidad química

El agua de los acuíferos inferiores, como las aguas de toda la Sierra de Gádor, siempre ha sido de menor salinidad, presentando la mejor calidad para los diferentes usos. En lo que respecta a los acuíferos de cobertera, existen zonas de mejor calidad (alimentadas subterráneamente por los acuíferos inferiores o, superficialmente, con las escorrentías superficiales desde la sierra, en los bordes de la llanura), y otras más cercanas al mar donde aumenta la concentración salina, principalmente debido a cloruro y sodio.

El uso de los acuíferos, además de afectar a la cantidad del agua (evoluciones de los niveles en los distintos acuíferos y del sentido del flujo entre los mismos), afecta también a la calidad del agua, que depende de las sustancias que ésta lleva. Es decir, la calidad original del agua de los acuíferos ha sufrido modificaciones con el uso, a lo largo del tiempo, variando la cantidad de algunas sales, por la entrada de sustancias que en principio no tenía y que provienen de:

- Contaminaciones generadas por los retornos del regadío
- Residuos agrícolas en basureros
- Vertederos de residuos sólidos agrícolas y urbanos
- Contaminaciones originadas en puntos y redes de saneamiento urbano
- Comunicaciones de acuíferos mediante sondeos profundos
- Tramos acuíferos de elevada salinidad natural o desde acuíferos superiores contaminados por las actividades generadas sobre su superficie; descargas subterráneas de flujos contaminados desde unos acuíferos a otros, forzadas por el bombeo

Además, el contacto directo de un acuífero con la superficie, lo hace también muy vulnerable a la contaminación directa por infiltración, arrastrando con el agua de infiltración sales y sustancias contaminantes (fertilizantes, pesticidas y residuos) que alteran la calidad del agua subterránea. La importante recarga por retornos en las capas libres de los acuíferos de cobertera está produciendo también contaminación en éstos,

siendo cada vez más frecuentes las concentraciones de nitratos próximas a 100 mg L^{-1} (con valores superiores a 400 mg L^{-1} localizados en pozos próximos a poblaciones) (Pulido-Bosch, 1998).

Existen diversos estudios que determinan la conductividad eléctrica (CE) de los acuíferos de la zona. Un estudio realizado por Cajamar (2003) estableció que en la comarca del Campo de Dalías, la CE media del agua subterránea se sitúa en torno a $1,9 \text{ dS m}^{-1}$, según la red del IGME (2003) la CE media supera los $2,5 \text{ dS m}^{-1}$. Los datos obtenidos en las mediciones realizadas con la red de la CMAOT (2012) pueden parecer algo más alentadores, puesto que el valor medio se ha visto reducido a $1,63 \text{ dS m}^{-1}$, registrándose conductividades eléctricas que varían desde $0,26 \text{ dS m}^{-1}$ hasta $5,96 \text{ dS m}^{-1}$, si bien esta red sólo cuenta con 17 puntos de observación frente a los 191 con los que contaba la del IGME y, teniendo en cuenta las enormes dimensiones de la masa de agua (103724 km^2), se puede concluir que la red es poco representativa además de poseer únicamente un punto de control realmente cercano a la costa.

Esta salinidad está relacionada con diferentes procesos: intrusión marina, contaminación agrícola, termalismo, presencia de salmueras, sobreexplotación y una elevada diversidad litológica unida a su estructura que confieren a la unidad una geometría muy compleja. Estos procesos son los responsables de los elevados contenidos en cloruros (269 mg L^{-1} de media con valores máximos de 1039 mg L^{-1}), sulfatos (128 mg L^{-1} de media con valores máximos de 509 mg L^{-1}) y sodio (138 mg L^{-1} de media con valores máximos de 612 mg L^{-1}) que se han detectado y superan ampliamente los valores límite considerados en el Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano (BOE 45/2003, de 21 de febrero). La concentración media de Ca y Mg se sitúa en 83 y 58 mg L^{-1} respectivamente (CMAOT, 2012).

Los elevados contenidos en nitratos (33 mg L^{-1} de media con valores máximos de 282 mg L^{-1}), han hecho que esta masa de agua haya sido designada por la Junta de Andalucía como zona vulnerable frente a la contaminación por nitratos (Real Decreto 140/2003), lo que unido a las altas concentraciones de nitritos y amonio son indicativos del grave problema que sufren las aguas subterráneas de esta masa, producto

fundamentalmente de la agricultura intensiva que se desarrolla sobre la misma y, en menor medida, de la actividad ganadera y urbana.

Según Martínez-Vidal (1997) puede cuantificarse la aportación de nitrato de diferente procedencia al Campo de Dalías. Debido al contenido en nitrato del agua de lluvia unas 125 t año^{-1} , por aguas residuales urbanas que se filtran en los acuíferos 150 t año^{-1} , a causa del abono animal y compost 4400 t año^{-1} , por regadíos 1800 t año^{-1} , debido al uso de fertilizantes inorgánicos 3000 t año^{-1} , lo que hace un total de 9500 t año^{-1} ; si bien de esa cantidad se deducen las salidas por bombeo de aguas, unas 1950 t año^{-1} , se obtiene un exceso de 7550 t año^{-1} , que bien se encuentran en el suelo (bien en la zona no saturada o en la saturada) sometidos a los procesos de transformación correspondientes.

Por otro lado, se han detectado también altos contenidos en distintos metales pesados, que tienen un origen no sólo atribuible a la litología sino que también hay que incluir el aporte producto de la actividad antrópica. También se ha detectado fluoruro posiblemente relacionado con la actividad agrícola por el aporte de fertilizantes de fosfato (CMAOT, 2012).

En ninguna de las dos redes (IGME, 2003; CMAOT, 2012) se ha detectado la presencia de boro, a pesar de que en diversas publicaciones (Martínez-Vidal, 1997; Pulido-Bosch et al., 1997) se pone de manifiesto el notorio contenido en este elemento en esta masa de agua. Este hecho puede deberse a que el boro está directamente asociado con los procesos de intrusión marina en el sector costero situado entre las localidades de Aguadulce y las proximidades de Las Marinas, así mismo en el sector situado entre las localidades de Balerna y Las Marinas, el origen del boro se asocia con la presencia de sales salobres y con lixiviado de materiales marinos.

Por todo lo anterior, el mal estado químico de la masa de agua es también bastante claro. En el documento de la Demarcación Hidrográfica de las Cuencas Mediterráneas Andaluzas de Andalucía (CMAOT, 2012) se establecen unas líneas de actuación y medidas para contribuir a la mejora del estado de los acuíferos del Campo de Dalías, entre las que se pueden destacar el fomento de actuaciones de reutilización de aguas residuales en el Campo de Dalías y que actualmente tienen como únicos beneficiarios los campos de golf y los respectivos ayuntamientos, excepto en el caso de

la EDAR de Roquetas, de la que se destinan 3 hm³ anuales de recursos regenerados a la comunidad de regantes Sol y Arena. Así como la continuación de los Programas de Actuación para Protección de las Aguas contra la Contaminación por Nitratos de Origen Agrario en Zonas Vulnerables, donde se limita la cantidad máxima de nitrógeno a aplicar dependiendo del cultivo.

1.2.1.2. Campo de Níjar-Bajo Andarax

Los acuíferos del Campo de Níjar y Bajo Andarax también se encuentran sobreexplotados y registran un deterioro de la calidad del agua.

Datos recientes estiman una extracción del acuífero de Campo de Níjar de 32 hm³ año⁻¹, siendo destinados a la agricultura prácticamente en su totalidad (91%; 29 hm³ año⁻¹), y una extracción del acuífero del Bajo Andarax de 13 hm³ año⁻¹, de los cuales 9,4 hm³ año⁻¹ son destinados a la agricultura (72%) (CMAOT, 2012).

a) Explotación

Campo de Níjar

El grave problema de sobreexplotación en el Campo de Níjar, que ya fue puesto de manifiesto en el Plan Hidrológico de la Cuenca Sur y por los diversos estudios realizados, estimando un volumen de sobreexplotación de 18-20 hm³ año⁻¹ (PHCS, 1999), confirmado por Resolución de la Junta de Gobierno de la antigua Confederación Hidrográfica del Sur (CHSE, actual Cuenca Mediterránea Andaluza), que declaraba como oficialmente sobreexplotados los acuíferos de la “Zona de Níjar” el 30 de diciembre de 2004. Esta situación se reafirma con los últimos datos de las redes de control del IGME (2003) y de la AAA (2009a). Si bien, las iniciativas de desalación de las plantas de Carboneras y Rambla Morales permiten albergar razonables esperanzas de que en el año 2015 la situación haya experimentado una importante mejoría, aunque seguramente aún insuficiente.

Bajo Andarax

Los acuíferos del Bajo Andarax, se pueden clasificar en tres unidades de acuerdo con la distribución de materiales: *Acuífero Detrítico*, *Carbonatado* y *Profundo* (Pulido-

Bosch et al., 1991; Sánchez-Martos et al., 2001). Están incluidos en la relación de unidades sobreexplotadas del Seguimiento y Revisión del Plan Hidrológico de las Cuencas del Sur (SRPHCS, 2002), siendo la zona del delta la más afectada. Aunque en algunos puntos próximos a la costa la evolución de los últimos años ha mostrado ciertos rasgos positivos, presumiblemente por la reutilización de efluentes depurados en riegos agrícolas y la puesta en funcionamiento de la desaladora, en otros continúa la tendencia descendente.

Los niveles piezométricos reflejan claramente un descenso, que en la zona del delta alcanzan cotas inferiores a los -10 m.s.n.m., dando lugar a procesos de intrusión marina. La CMAOT (2012) cuenta tan sólo con un punto con varios años de medidas, en el que se observan descensos sustanciales que están próximos a los 5 metros año⁻¹. Todo ello indica que la masa de agua presenta un impacto por sobreexplotación.

b) Calidad química

Campo de Níjar

La problemática de salinización por sobreexplotación en la masa de agua subterránea del Campo de Níjar se inició hace casi tres décadas, cuando una captación alejada de la costa comenzó a bombear aguas de alta salinidad. Desde entonces, la situación ha continuado agravándose, aumentando progresivamente las concentraciones salinas en todo el ámbito de la unidad hidrogeológica y ampliándose la zona afectada por procesos de intrusión. Las facies de esta masa de agua subterránea son fundamentalmente clorurada sódico-magnésica, con una fuerte componente sulfatada. Es destacable el elevado contenido en cloruros, cuyo máximo absoluto detectado en un punto de muestreo situado a una distancia de más de 14600 m de la línea de costa, es de 2162 mg L⁻¹. Tanto el contenido en cloruros como los elevados valores de conductividad eléctrica ponen de manifiesto el grave problema de intrusión marina que sufre esta masa de agua subterránea, producto de la sobreexplotación. Sánchez-Martos (1997) detecta una CE en el acuífero entre 1 y 4 dS m⁻¹ y un estudio realizado por Cajamar y la Diputación Provincial de Almería (2003) cifra una CE media del agua en torno a 4 dS m⁻¹.

El IGME no cuenta con una red de control de la intrusión específica para el Campo de Níjar, pero sí ha venido efectuando un seguimiento de la problemática a través de su red de control de la calidad que dispone de 33 puntos. El 42% de los puntos registra un contenido medio histórico en ión cloruro superior a 1000 mg L^{-1} , porcentaje que sube hasta el 47% si se contabiliza únicamente la última medición. Es de destacar que uno de los puntos en los que la afección es más intensa (1770 mg L^{-1} de Cl^- y CE de $7,27 \text{ dS m}^{-1}$) se localiza en el centro geométrico del acuífero, a unos 17 km de la línea de costa.

En este contexto cabe plantearse si es más oportuno mantener el diagnóstico de grado de intrusión zonal, o asignarle el de “general” a la mitad sur de la unidad, ya que el ámbito afectado es porcentualmente mayor aquí que en los acuíferos del Campo de Dalías-Sierra de Gádor, en la que se ha seguido el segundo criterio.

Las medidas realizadas por la red de la CMAOT (2012) corroboran los datos tan preocupantes, llegando a medirse valores puntuales de concentración de cloruros de hasta 2162 mg L^{-1} y de sodio de 1175 mg L^{-1} . La concentración de boro, que no se medía en la red del IGME, arroja valores medios superiores a los 4 mg L^{-1} .

La concentración de nitratos en la masa de agua subterránea es bastante elevada, presentado valores medios de casi 50 mg L^{-1} y picos superiores a los 300 mg L^{-1} . Los valores medios de amonio superan 1 mg L^{-1} , y en la red del IGME (2003) se llegó a medir un valor de 77 mg L^{-1} . El contenido en nitratos y amonio indican del impacto al que están sometidas las aguas de esta masa, producto de las fuertes presiones por parte de los sectores agrícola y ganadero principalmente.

Otros elementos que exceden los límites del Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano (BOE 45/2003, de 21 de febrero) son, de manera puntual el níquel, fluoruro, selenio, cromo, mercurio, plomo y arsénico; y de manera general, el hierro y el manganeso. A la luz de estos datos la masa de agua subterránea presenta un impacto por quimismo.

También indicar que se ha detectado la presencia de varios plaguicidas, destacando la presencia de glifosato con una concentración superior a la establecida en la norma de calidad (CMAOT, 2012).

Bajo Andarax

Los acuíferos correspondientes al Medio-Bajo Andarax presentan un aumento de la salinidad desde la zona norte de la masa hasta la zona cercana al mar. Este deterioro de la calidad química del agua se debe principalmente al aumento en sulfatos y nitratos, cuya procedencia puede residir en las aguas de retorno de riego de los cultivos de la zona (cultivos de regadío) y por la sobreexplotación a la que se ve sometido el acuífero.

Se observa como el agua de facies sulfatada-cálcica va aumentando la concentración en sulfatos y nitratos aguas abajo hasta la zona más próxima al mar donde cambia la facies a cloruradas-sulfatadas sódicas debido a la intrusión marina que afecta al acuífero.

La conductividad media en la red del IGME superaba los 4,2 dS m⁻¹ y en varios puntos los 10,0 dS m⁻¹ (máximo 12,8 dS m⁻¹). La problemática de intrusión es generalizada en el sector del delta.

Estudiando las tres unidades, la calidad de las aguas del *Acuífero Carbonatado* es la más aceptable del área, utilizándose para abastecimiento urbano y riego. Su mineralización es baja, los valores de residuo seco oscilan entre 1-1,5 g L⁻¹. Su facies es mixta, con un equilibrio entre la bicarbonatada-sulfatada y predominio de la magnésica sobre la cálcica, con peligro de salinización alto (puesto que su conductividad supera los 0,75 dS m⁻¹) y de alcalinización bajo. El problema más significativo aparece como consecuencia del incremento de las explotaciones en los años 70-80, lo que produce un descenso de niveles, reflejo de la intensa explotación del sistema, lo que obligó al abandono de numerosas explotaciones. Desde el punto de vista hidroquímico, cabe destacar los elevados contenidos en sulfato, con valores medios de 430 mg L⁻¹, y un amplio rango (140-940 mg L⁻¹). Las concentraciones de boro son muy bajas, inferiores a 0,59 mg L⁻¹ y con valores medios de 0,20 mg L⁻¹ (Sánchez-Martos, 1997). El *Acuífero Detrítico* es el más extenso del área. La mayor parte de la actividad agrícola y urbana

está asentada sobre él, lo que hace que los procesos de contaminación afecten a sus aguas en mayor medida. La composición química de estas aguas es muy diversa, con una amplia gama de facies. Presentan una gradación entre las aguas sulfatadas cálcicas y/o magnésicas, cloro-sulfatadas-sódico-magnésicas y cloruradas sódicas. Las primeras corresponden al sector Gádor-Santa Fe, donde la CE es inferior a 2 dS m^{-1} . Los otros dos grupos aparecen mayoritariamente en el entorno de Rioja-Rambla de Tabernas, con CE superior a 4 dS m^{-1} , y en el sector del delta, cuyas aguas superan los 8 dS m^{-1} . Las aguas subterráneas experimentan un aumento en el contenido salino en la dirección del flujo subterráneo sobre el área de Santa Fe hasta el delta. Los contenidos de boro son bastantes más elevados, alcanzándose máximos de $1,55 \text{ mg L}^{-1}$ y valores medios de $0,97 \text{ mg L}^{-1}$ (Sánchez-Martos, 1997). El *Acuífero Profundo* presenta una litología carbonatada, las aguas presentan facies sulfatada-clorurada sódica, con conductividades variables entre $2,5\text{-}4,5 \text{ dS m}^{-1}$, elevados contenidos de ion sulfato, ($700\text{-}800 \text{ mg L}^{-1}$), cloruro ($500\text{-}700 \text{ mg L}^{-1}$) y sodio ($500\text{-}700 \text{ mg L}^{-1}$). Este agua plantea, desde el punto de vista agrícola, un peligro de salinización de alto a muy alto y un riesgo de alcalinización de medio a alto. Riesgo que se acentúa para los cítricos puesto que el contenido en boro es muy elevado. A pesar de la mala calidad de sus aguas se utiliza para riego en el sector costero, Llanos del Alquíán, donde las aguas son de mala calidad, en cultivos de hortalizas, más tolerables al boro. La concentración de boro es la más elevada de todo el Bajo Andarax, oscilando entre 2 mg L^{-1} y 8 mg L^{-1} (Sánchez-Martos, 1997).

En lo que respecta al contenido de nitratos, está designada por la Junta de Andalucía como zona vulnerable frente a la contaminación por nitratos, la heterogeneidad de las concentraciones que se observan (de 0 a 370 mg L^{-1}) atiende a las diferentes características que presentan la distribución de los materiales que originan las tres unidades distintas que lo conforman.

Se obtienen valores puntuales de amonio y nitritos que superan los umbrales en el *Acuífero Profundo*, con concentraciones muy bajas de oxígeno disuelto. También se registran en algunos puntos concentraciones más elevadas de hierro y manganeso a consecuencia de los procesos típicos de reducción propios de aguas cercanas a la anoxia.

Sánchez-Martos (1997) concluye que los dos principales problemas que afectan, desde el punto de vista hídrico, al Bajo Andarax están relacionados con la irregularidad en la distribución de los recursos hídricos y con la calidad del agua, que presenta elevados contenidos salinos y altas concentraciones en boro. La minimización de esta situación pasa por la optimización de los recursos hídricos superficiales y la reutilización de las aguas residuales urbanas, al objeto de incrementar la recarga en el *Acuífero Detrítico* con aguas de mejor calidad y reducir sus extracciones.

1.2.1.3. Bajo Almanzora

Al igual que lo ocurrido con los sistemas de acuíferos del Campo de Dalías y Campo de Níjar y Bajo Andarax, en los acuíferos del Bajo Almanzora existen problemas de sobreexplotación y deterioro de la calidad del agua (CMAOT, 2012).

a) Explotación

Esta masa de agua subterránea está incluida en la relación de unidades hidrogeológicas sobreexplotadas (CMAOT, 2012). Su sobreexplotación se manifiesta tanto por la evolución piezométrica como por el gran deterioro de la calidad de sus recursos (baja tasa de renovación e intrusión marina), que se desarrolla en el apartado siguiente.

En lo que respecta a la sobreexplotación existe un descenso del nivel piezométrico registrándose niveles negativos en toda una línea de puntos de control situados paralelamente a la línea de costa y más de un kilómetro y medio de ésta.

b) Calidad química

La masa de agua correspondiente al Bajo Almanzora cuenta en la actualidad únicamente con tres puntos de control de calidad pertenecientes a la CMAOT y uno de ellos completamente salinizado, dada su cercanía al mar y su escasa profundidad. Aún así, se pueden apreciar diferencias en la salinidad entre los registros tomados en la zona aguas arriba y los pertenecientes al sector de la desembocadura. Se aprecia cómo se pasa del primer punto de control con valores en torno a 2 dS m^{-1} a valores de 6 y 7 dS m^{-1} en la zona más cercana al mar.

En cuanto a la facies del agua, tanto el punto ubicado en el sector aguas arriba del acuífero como el situado cerca de la desembocadura presentan la misma facies sulfatada cálcica, sólo que éste último con valores de conductividad tres veces superiores.

Los elevados valores de conductividad eléctrica y las elevadas concentraciones de sulfatos, cloruros y sodio son principalmente debidos a un proceso de sobreexplotación no racionalizado que ha supuesto un grave impacto en el estado químico de las aguas subterráneas. A este proceso también hay que añadirle la existencia de facies evaporíticas del Mioceno, si bien este último factor no es el principal causante del mal estado de las aguas subterráneas de la masa de agua del Bajo Almanzora.

El elevado contenido en nitratos es indicativo principalmente de una mala praxis en el uso de fertilizantes en la agricultura, aunque en menor medida también contribuyen los campos de golf y la ganadería en estos. Desde el año 2002 hasta el 2009, el contenido medio de nitratos es de 129 mg L^{-1} , valor que duplica ampliamente al valor límite indicado en el Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad de consumo humano (BOE 45/2003, de 21 de febrero).

Aunque el contenido en boro es de origen natural (el boro se localiza asociado a las evaporitas y ha sido removilizado por la sobreexplotación del acuífero profundo), su presencia es causa de la sobreexplotación.

Con esta situación, Pulido-Bosch et al. (2012) concluyen que el esquema de suministro de agua en la provincia de Almería no es sostenible con los planteamientos actuales, pudiendo colapsar el sistema productivo en cualquier momento de no hacer las correcciones oportunas. Ahorro de agua, reutilización de las aguas residuales convenientemente depuradas y esterilizadas son dos de las soluciones imprescindibles. Pero si se parte del hecho de que el gran consumidor de agua es la agricultura, cuanto contribuya al ahorro de agua, a mejorar la eficiencia del riego, a reutilizar las aguas residuales debidamente depuradas, estaremos avanzando en la mejoría de la gestión del escaso recurso hídrico disponible; por ello, éstas son otras tantas prácticas que deben llevarse a cabo. La construcción de grandes plantas desaladoras, que constituye una

solución casi definitiva desde el punto de vista técnico, plantea el problema del costo real de explotación (Martínez, 2011). Muchos de los agricultores no están dispuestos o no se pueden permitir pagarlo. Ahora bien, la coordinación entre la aplicación urbana del agua desalada y el posterior uso en agricultura de las aguas residuales tratadas permitirá aumentar las disponibilidades y la disminución de los actuales bombeos, con la consiguiente mitigación de los efectos negativos ya producidos. Por lo tanto, se habrá avanzado en la línea de la sostenibilidad.

1.2.2. Agua regenerada en la horticultura de Almería

El aumento de los problemas de escasez de agua en el mundo y el rápido incremento de la población son factores que han impulsado el aprovechamiento de los recursos hídricos no convencionales como son las aguas residuales urbanas regeneradas, sobretodo en zonas áridas y semiáridas.

Según datos del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (MARM) en España se reutilizan anualmente entre 400 y 450 hm³ sobre 3400 hm³ de aguas depuradas, destinando el 80% al regadío. Las actuaciones de reutilización en España se han desarrollado principalmente en las zonas con mayor escasez de recursos hídricos como son las provincias del litoral mediterráneo y las Islas Baleares y Canarias. A nivel global el volumen de reutilización continúa siendo bajo, pero si se considera el periodo de referencia 1996-2005, el volumen de agua reutilizado prácticamente se ha duplicado en 2004-2005, superando los 1,2 hm³ diarios frente a los 0,55-0,75 hm³ registrados en los años anteriores. En Andalucía actualmente se generan 518 hm³ año⁻¹ de agua depurada con un nivel de reutilización muy bajo, inferior al 10% (45 hm³) (AAA, 2009b). Teniendo en cuenta que el déficit hídrico en el conjunto de la región se ha cifrado en unos 1000 hm³ año⁻¹ (Corominas et al., 2001) resulta evidente la potencialidad del recurso agua regenerada (AR) para la comunidad autónoma.

Es indudable que la obligatoriedad de la Directiva 91/271 CEE sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas, desarrollado en el Plan Nacional de Saneamiento y Depuración 2000-2005 y en el actual Plan Nacional de Calidad de las Aguas: Saneamiento y Depuración (2007-2015) van a potenciar las actuaciones de reutilización en España. Estos Planes son la pieza fundamental de planificación del MARM junto a las CCAA para la realización de las diferentes infraestructuras en

materia de saneamiento y depuración y que promueve garantizar la calidad del vertido, estudiar caudales depurados disponibles y posibles demandas y potenciar la reutilización planificada. La aplicación de la Directiva 91/271/CEE facilita la reutilización al crear un sistema de mejora de calidad de los efluentes y la disponibilidad de volúmenes de aguas depuradas cerca de los lugares de demanda. Se estiman en $1200 \text{ hm}^3 \text{ año}^{-1}$ las aguas depuradas potencialmente reutilizables para 2015 de las cuales 518 hm^3 se utilizarán en Andalucía. Por otra parte, se hace preciso establecer una regulación reglamentaria más completa y detallada que posibilite las soluciones necesarias respecto de la reutilización. Así se define el concepto de reutilización y se introduce la denominación de aguas regeneradas en el Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, donde se ha establecido el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas.

En Andalucía, de los $45 \text{ hm}^3 \text{ año}^{-1}$ que se reutilizan, el 52% es utilizado para riego de campos de golf y el 38% para uso agrícola, de los cuales alrededor del 50% se utiliza para riego de 2500 ha de cultivos intensivos en la Comarca del Bajo Andarax en Almería (CMA, 2011). La reutilización en los regadíos el litoral de la provincia es un recurso estratégico considerando el déficit hídrico estructural que padece, con una denominada lluvia eficaz de unos $40\text{-}42 \text{ mm año}^{-1}$ (Salinas, 2001), elevada evaporación por la alta insolación y escasa cubierta vegetal que impide la retención de agua en el terreno, además de la sobreexplotación y deficiente calidad de los acuíferos causado por el sector agrícola (intrusión marina, salinidad y contaminación por nitratos) (Sánchez-Martos, 1997; Martínez-Vidal, 1997; CMAOT, 2012) que se ha comentado ampliamente en el apartado 1.2.1.

La reutilización de las aguas depuradas de Almería capital en la subcomarca del Bajo Andarax cumple un doble objetivo, el socioeconómico al garantizar el suministro de agua para riego en la comarca y por tanto la supervivencia de la agricultura que se practica en esta zona, y el medioambiental al reducir la contaminación del vertido de las aguas residuales al mar (Pérez-Parra y Vallverdú, 1997). En la actualidad, prácticamente la totalidad de la superficie regada con AR en la comarca del Bajo Andarax se dedica a la producción de tomate, debido a que históricamente la producción hortícola se ha basado en el monocultivo de tomate, por la elevada salinidad de las aguas de riego convencionales con CE de hasta $4,5 \text{ dS m}^{-1}$ (Sánchez-Martos, 1997), pero actualmente, con las características agronómicas de este efluente puede ser posible la producción de

otros cultivos de alta rentabilidad como es el caso de pimiento, melón e incluso judía como lo demuestran los diferentes estudios realizados (Contreras, 2001; Segura et al., 2012; Contreras et al., 2013a; Martínez et al., 2013).

1.2.2.1. Campo del Bajo Andarax

Las propiedades de las aguas regeneradas utilizadas en la comarca del Bajo Andarax (Almería), muestran una composición variable en el tiempo, algo común en estos efluentes debido a su origen, ya que provienen de aguas residuales que son de composición muy variable. Por este motivo, es necesario realizar controles analíticos periódicos en las aguas de riego, para conocer, entre otros parámetros, la concentración de nutrientes y ajustar la dosis de aplicación de fertilizantes comerciales de forma óptima durante el ciclo de cultivo.

En la Tabla 1.1 se recogen las concentraciones medias de elementos y los valores máximos y mínimos registrados a lo largo de varios años de estudio. Se ha dividido en dos periodos, un primer periodo (2001-05) en el que el tratamiento de regeneración se realizaba con ozono y un segundo periodo (2006-09) en el que el tratamiento de regeneración era una combinación de ozono y cloro.

Tabla 1.1. Características del agua regenerada, pH, conductividad eléctrica (CE, dS m⁻¹), concentración de sales (mmolc L⁻¹), relación de adsorción de sodio (RAS) y clasificación US del tipo de agua según Riverside. Periodo 2001-2005 Número de medidas=31; Periodo 2006-2009 Número de medidas=12.

		Periodo 2001/05			Periodo 2006/09
		Media	Máximo	Mínimo	Media
pH		7,70	8,13	7,38	8,30
CE	dS m ⁻¹	1,78	2,15	1,40	2,11
HCO ₃ ⁻		8,00	9,70	5,60	6,60
Cl ⁻		7,14	11,0	5,00	8,93
SO ₄ ²⁻		3,14	5,25	1,50	5,25
N-NO ₃ ⁻		0,21	0,54	0,00	0,34
H ₂ PO ₄ ⁻		0,37	0,52	0,27	0,37
N-NH ₄ ⁺	mmolc L ⁻¹	3,13	4,21	2,07	3,27
Ca ²⁺		3,55	5,84	2,40	4,82
Mg ²⁺		3,60	5,47	2,74	4,24
Na ⁺		8,60	10,9	6,30	11,1
K ⁺		0,59	0,99	0,28	0,64
RAS		4,41	4,59	3,93	5,21
Riverside		C ₃ S ₁			C ₃ S ₁

Fuente: Elaboración propia.

El pH del agua regenerada se encuentra dentro de los rangos normales, y la CE es inferior a 3 dS m⁻¹ que es el límite máximo que estipula el Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, para uso en riego de cultivos. Es interesante destacar que la conductividad eléctrica del agua regenerada es inferior a la que presenta, en la comarca productora del Bajo Andarax, el agua procedente de acuífero, con lo cual para esta comarca, el agua regenerada se convierte en un recurso hídrico de mejor calidad que el convencional en lo que a salinidad se refiere.

Un aspecto de gran interés desde el punto de vista agrícola es la concentración de nutrientes que presenta, especialmente nitrógeno en forma amoniacal que en determinados cultivos y etapas de producción es suficiente para cubrir las necesidades de la planta, con el consiguiente ahorro de fertilizantes. El agua regenerada del Bajo Andarax también presenta una importante concentración de fosforo y en menor medida

de potasio, que hay que considerar al establecer el programa de fertilización de los cultivos.

La concentración de sólidos en suspensión del agua regenerada varia durante el periodo de estudio (Tabla 1.2) pero los niveles registrados siempre estuvieron por debajo del límite más restrictivo recogido en el Real Decreto 1620/2007 para riego que es de 20 mg L^{-1} . En un efluente regenerado, el principal problema que ocasiona la presencia de sólidos en suspensión es la posible obturación del sistema de riego localizado, si bien los valores registrados en los años de estudio son muy inferiores a 50 mg L^{-1} que según Ayers y Westcot (1985) es el límite para que el agua no presente ningún riesgo de obturación del sistema de riego.

El agua regenerada presenta valores bajos de turbidez (Tabla 1.2), inferiores a los estipulados en el RD 1620/2007 y en la EPA (1992) para el riego de cultivos de consumo en crudo. Los valores de DQO y la DBO_5 también varían en el tiempo (Tabla 1.2) pero en ningún caso sobrepasaron el nivel aconsejado para aguas residuales destinadas para el riego de cultivos (Rico et al., 1998). El Real Decreto 1620/2007 no hace referencia a estos parámetros.

Tabla 1.2. Características del agua de riego, sólidos en suspensión (mg L^{-1}), turbidez (UNT), DQO ($\text{mgO}_2 \text{ L}^{-1}$), DBO_5 ($\text{mgO}_2 \text{ L}^{-1}$). Número de medidas=15.

	Periodo 2000/05		
	Media	Máximo	Mínimo
Sólidos en suspensión (mg L^{-1})	6,93	10,0	2,50
Turbidez (UNT)	0,18	0,83	0,00
DQO ($\text{mgO}_2 \text{ L}^{-1}$)	34,3	46,0	9,20
DBO_5 ($\text{mgO}_2 \text{ L}^{-1}$)	8,61	18,3	2,00

Fuente: Elaboración propia basado en Martínez (2005).

Una gestión sostenible de las aguas regeneradas para riego de cultivos hortícolas debe estar basada en el conocimiento de factores agronómicos y de impacto sobre la salud y el medioambiente. Dentro de los factores agronómicos hay que considerar que el riego continuo con las aguas residuales puede tener un impacto significativo sobre las propiedades químicas y la fertilidad del suelo (Mohammad y Mazahreh, 2003). En el

caso concreto de cultivos con menor tolerancia a la salinidad como es el cultivo de pimiento y judía, el riego con las aguas residuales tratadas requiere una evaluación previa del efecto de la salinidad en el suelo y sus efectos en la planta, considerando su tolerancia a la salinidad, con objeto de gestionar de forma eficiente el riego con estos efluentes.

Otro factor agronómico de gran importancia es el relativo a la carga fertilizante del agua. Su contenido en nutrientes, especialmente N, P y K, elementos esenciales para la nutrición de las plantas, la convierte en un buen fertilizante que puede aumentar los rendimientos del cultivo (Shahalam et al., 1998; Ramírez-Fuentes et al., 2002) y reducir el uso de fertilizantes minerales (Segura et al., 2004, 2012; Contreras et al., 2013a). Sin embargo manejos inadecuados de la fertilización y el riego con estos efluentes pueden aportar al cultivo cantidades de nutrientes mayores a sus requerimientos específicos y producir acumulaciones excesivas en la planta y en el suelo, afectando negativamente los rendimientos y la calidad de la producción (Mohammad y Mazahreh, 2003; Kang et al., 2007; Mohammad-Rusan et al., 2007). Por tanto, el manejo del riego y la fertilización con las aguas regeneradas requiere tanto el conocimiento del contenido de nutrientes del agua en relación a las necesidades específicas del cultivo, fertilidad y propiedades químicas del suelo, para ajustar la dosis de aplicación de efluente y de fertilizantes minerales de forma óptima.

Aunque no es el objetivo específico de esta Tesis, hay que indicar en relación al impacto sobre la salud y el medioambiente, que la reutilización de las aguas residuales puede plantear una serie de problemas relativos a la presencia de sustancias contaminantes de origen químico y microbiológico. Entre los posibles contaminantes presentes en aguas residuales se encuentran diferentes familias de contaminantes orgánicos. El Real Decreto 1620/2007 establece el régimen jurídico de esa reutilización estableciendo valores máximos admisibles de sólidos en suspensión, turbidez, nematodos intestinales, *Escherichia coli*, y otros criterios como las concentraciones de contaminantes que deben cumplir las normas de calidad ambiental.

El riesgo de transmisión de enfermedades por los microorganismos patógenos del agua de riego está influenciado por el nivel de contaminación, persistencia del patógeno en el agua, en el suelo y en el cultivo y deficientes medidas higiénicas en la

manipulación de los frutos (Steele y Odumeru, 2004). Sin embargo la obtención de agua con un nivel de desinfección suficiente para el riego de los cultivos sin restricciones reduce ostensiblemente estos riesgos. No obstante la presencia de diversos organismos patógenos, como *Escherichia coli*, *Salmonella sp.*, *Shigella sp.*, etc., pueden perdurar en el agua incluso después de haber sido sometida a algún tratamiento de desinfección. Si bien estos organismos encuentran en el suelo un medio hostil para su supervivencia, ya que la exposición al aire, la radiación ultravioleta solar, el pH del suelo y la competencia con la microflora y microfauna autóctonas, adaptadas a las condiciones existentes, hacen difícil la persistencia de estos patógenos (Loehr et al., 1979).

Los trabajos de investigación realizados con el agua regenerada del Bajo Andarax muestran que en los suelos enarenados de los invernaderos no se detectó presencia de coliformes totales y fecales en la superficie de la capa de arena (2 primeros centímetros), siendo muy baja en la capa subsuperficial (8 centímetros restantes de arena) no siendo detectados en el suelo (Contreras, 2001). Por otra parte, Vadell et al. (1998) encontraron que la mayor concentración de coliformes totales y fecales se sitúa en la superficie del suelo (0-2 cm) disminuyendo con la profundidad hasta un 85-90% a 5 cm de profundidad. En esta línea Tzanakis et al. (2003) no encontraron coliformes fecales en suelo a partir de 30 cm de profundidad. En cuanto a los efectos en fruto son numerosas las investigaciones que demuestran la ausencia de contaminación por bacterias fecales (*E. coli* y coliformes fecales) en hortalizas regadas con aguas residuales tratadas (Maloupa et al., 1999; Beltrão et al., 2014) y desinfectadas (Segura et al., 2001; Contreras, 2001). En el caso de las aguas residuales tratadas de la ciudad de Almería cuando los parámetros de contaminación se sitúan en los valores establecidos por el Real Decreto 1620/2007 no se producen fenómenos de contaminación bacteriológica en los sistemas de producción comerciales (Segura et al., 2001; Contreras, 2001; Contreras et al., 2002).

CAPITULO II

Revisión Bibliográfica

2.1. FERTIRRIGACIÓN

El término fertirrigación no está incluido en el *diccionario de la lengua española*, aunque su utilización está totalmente extendida. La fertirrigación se puede definir como una técnica de fertilización que consiste en aplicar los nutrientes disueltos en agua. Si bien, en la mayoría de los casos, la fertirrigación está asociada con la aplicación conjunta de agua y fertilizantes a través del sistema de riego localizado.

La fertirrigación permite el ajuste de la cantidad y la concentración de nutriente aplicada de acuerdo a las necesidades de los cultivos durante todo el período de crecimiento. Para suministrar los nutrientes al cultivo de manera efectiva, se debe conocer la tasa óptima de consumo diario de nutrientes durante cada fase de crecimiento que asegure el máximo rendimiento y calidad de los productos (Scaife y Bar-Yosef, 1995).

Esta técnica permite suministrar los nutrientes solo en la zona donde se concentran las raíces, con lo cual aumenta significativamente la eficiencia de uso de los fertilizantes, lo que significa que la cantidad de fertilizante aplicado se puede reducir. Esto no sólo disminuye los costes de producción sino que también reduce el potencial de contaminación de las aguas subterráneas, causado por la lixiviación de fertilizante y la acumulación de nutrientes y sales en el suelo (Gianquinto et al., 2013).

En la fertirrigación no solo es importante la concentración de nutrientes, lo es aún más el volumen de agua aplicado. La textura del suelo es crucial para la determinación de la dotación de riego en la que se aplican los nutrientes, ajustando la dotación se evitará que el agua y los nutrientes se pierdan por percolación y lixiviación respectivamente. Como regla general Enzo et al. (2001) establecen que en suelos gruesos (arenosos) el volumen de fertirrigación no debe exceder de 200 ml por planta y emisor para evitar la lixiviación de nutrientes. En los suelos de textura más fina (arcillosos), caracterizados por mayor capacidad de retención de agua, y menor macroporosidad, el volumen de fertirrigación debe aumentarse como mínimo a 300 ml por planta. En los suelos enarenados de los invernaderos de Almería, Contreras et al. (2014b) muestran la influencia que tiene la textura del suelo en el bulbo húmedo generado, presentando los suelos arenosos un nivel de humedad inferior y un gradiente horizontal de humedad volumétrica mucho más acentuado que los suelos arcillosos.

Además concluyen que, en todos los suelos, con el volumen de riego aplicado comúnmente, 1500 ml por planta (30 min de riego, emisores de 3 L h^{-1}) y el marco de riego usual (0,5 m de distancia entre emisores y 1 m de distancia entre ramales portagoteros) se humedece el perfil del suelo en su totalidad, generando líneas húmedas.

2.1.1. La absorción de nutrientes como base de fertirrigación

La tasa de absorción de nutrientes por la planta y la proporción en que los diferentes elementos son absorbidos por las raíces están influenciadas por las condiciones ambientales (luz, temperatura y humedad) y varían considerablemente durante las diferentes etapas de crecimiento, sobre todo en cultivos de ciclo largo, como los cultivos hortícolas. De hecho, también se observan variaciones en la absorción mineral en cortos espacios de tiempo, como por ejemplo durante el período de 24 horas, pero son menos relevantes para la gestión práctica de la fertilización.

También hay otros factores que influyen en la absorción de nutrientes, en particular, su concentración y la de otros elementos (efecto sinérgico o antagonista), así como el pH, la salinidad total y la humedad del medio de cultivo. Sin embargo, la tasa de absorción de nutrientes está influenciada principalmente por la demanda asociada al crecimiento de las plantas, aunque, en algunos casos, se puede ocasionar un consumo de lujo de nutrientes. El consumo de lujo se produce cuando el cultivo absorbe nutrientes sin tener un aumento correspondiente en el rendimiento (Figura 2.1). Esto conlleva además de un gasto extra de fertilizantes, otras desventajas potenciales: exuberante crecimiento, deterioro de la flor y la formación del fruto, aumento de la susceptibilidad a plagas y enfermedades, trastornos en la maduración del fruto y empeoramiento de la calidad del fruto (por ejemplo, cambios en la composición y textura), y en algunos cultivos, acumulación de nitratos en los órganos comestibles, que son perjudiciales para la salud humana.

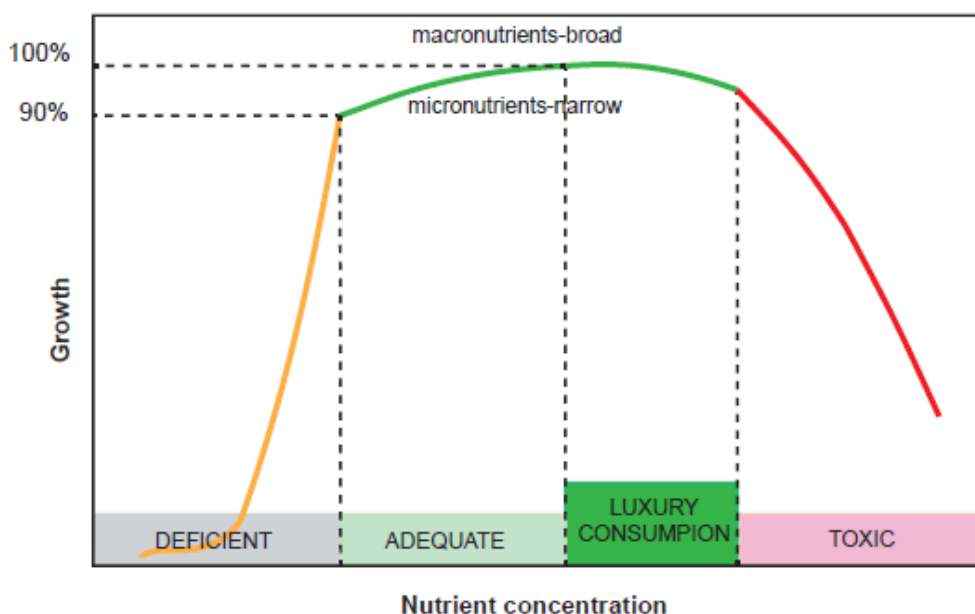


Figura 2.1. Respuesta típica del crecimiento de una planta al incremento de la concentración de nutrientes. Fuente: Gianquinto et al. (2013).

La determinación de una concentración de absorción de nutrientes es un parámetro utilizado por diversos autores (Sonneveld, 2000; Savvas, 2002; Carmassi et al., 2007; Sonneveld y Voogt, 2009; Massa et al., 2011) para modelar la absorción de nutrientes y otros iones no esenciales (por ejemplo el Na) realizada por los cultivos. Estos modelos, basados en el concepto de concentración de absorción, han sido criticados por otros autores (Le Bot et al., 1998; Silberbush y Ben-Asher, 2001) basándose en que la absorción de agua y de nutrientes son procesos independientes, a pesar de la influencia recíproca, y por lo tanto es difícil de predecir la concentración de la absorción de los diferentes nutrientes.

Existe una amplia bibliografía donde se determinan las disoluciones nutritivas a aportar para cultivos hortícolas de invernadero, algunas de ellas se muestran en la Tabla 2.1. Ante la variabilidad existente, Gianquinto et al. (2013) establecen el intervalo de las disoluciones de fertirrigación aplicadas en cultivos de invernadero (Tabla 2.2).

Tabla 2.1. Soluciones nutritivas recomendadas por diversos autores para cultivos hortícolas.

Autor	NO ₃ ⁻	PO ₄ ⁻	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NH ₄ ⁺	SO ₄ ⁻
	(mmol L ⁻¹)						
Hoagland y Arnon (1950)** ^(a)	14	1,0	6,0	4,0	2,0	1	2,0
Steiner (1968)**	11,9	1,0	7,2	4,5	2,0		3,45
Coïc y Lesaint (1975)	12	3,3	5,2	6,2	1,5	2	1,5
Cooper (1977) ^(a,b)	14,3	1,9	8	4,2	2,2		4
Sonneveld (1980) ^(b)	10,5	1,5	7,5	3,75	1,0	0,5	2,75
Graves (1983)	12,8	1,6	10,2	5,6	2,0		3,0
Cadahía et al. (1988)* ^(b)	16*	2	9	5,5	1,5		2,5
White (1992) ^(b)	20,3	2,3	11,1	6,1	3,3		5
Escudero (1993) ^(b)	10-18	1,0-1,5	7-9	4-6	1,5-2,5		1,5-2,5
Martínez y García (1993) ^(a)	12	1,5	7,5	3,5	1,25	0,5	2
Camacho (2003) ^(b)	9-14	1,5-2,0	5,0-6,0	2,0-4,0	1,0-2,0	0,4-1,5	1,5-2,0
Camacho (2003) ^(c)	9-16	0,6-1,2	4,0-8,0	4,0-8,0	1,5-3,0	0,2-0,5	1,5-2,0
Camacho (2003) ^(d)	9-13	1,6-2,0	4,0-5,4	4,0-6,0	1,5-3,0	0,3-0,5	1,5-2,0

*El 20% puede ser aplicado como NH₄⁺; ** Se recomienda 1-2 mmol L⁻¹ NH₄⁺; ^(a) Hidropónico; ^(b) Tomate; ^(c) Melón; ^(d) Pimiento.

Tabla 2.2. Rango de concentración de nutrientes aplicado en la solución de fertirrigación para cultivos de invernadero (mg L⁻¹).

Nutriente	Rango de Concentración	Nutriente	Rango de Concentración
	(mg L ⁻¹)		(mg L ⁻¹)
Nitrogeno (N)	50-200	Hierro (Fe) ^a	1,0-4,0
Fosforo (P) ^a	10-50	Manganeso (Mn) ^a	0,5-2,0
Azufre (S)	-	Zinc(Zn) ^a	0,2-0,5
Potasio (K)	100-250	Cobre (Cu) ^a	0,02-0,06
Calcio (Ca) ^a	50-150	Boro (B) ^a	0,2-0,5
Magnesio (Mg) ^a	20-50	Molibdeno (Mo) ^a	0,02-0,10

^a Generalmente no incluidos en los planes de fertirrigación a menos que haya unos niveles inadecuados en suelo.

Fuente: Gianquinto et al. (2013).

Por otra parte, en muchas especies la variación de la concentración del ión absorbido es más pronunciada que la variación de la tasa de absorción diaria (Sonneveld y Voogt, 2009; Carmassi et al., 2007; Gallardo et al., 2009), y un ejemplo se recoge en

la Tabla 2.3. Esto ocurre porque la tasa de absorción de agua, que está dominada por la transpiración de la hoja, responde rápidamente a los cambios en el área foliar y a las condiciones ambientales, especialmente la radiación. Por lo tanto, aunque la concentración de absorción se utiliza a menudo para el manejo de la fertirrigación en cultivos en sustrato (Gallardo et al., 2009; Sonneveld y Voogt, 2009), es necesario tener en cuenta el notable efecto de la radiación sobre la concentración de la absorción de nutrientes. De hecho, la concentración de absorción disminuye con niveles altos de radiación como respuesta al incremento de la transpiración de la planta que genera un aumento de mayor magnitud en la absorción de agua que en la demanda mineral de la planta.

Tabla 2.3. Rango máximo de absorción de nitrógeno, potasio y agua en plantas de tomate de crecimiento indeterminado bajo invernadero en diferentes periodos y concentración de absorción de N y K.

Periodo	Absorción por planta			Concentración de absorción	
	N mg h ⁻¹	K mg h ⁻¹	Agua mL h ⁻¹	N mg L ⁻¹	K mg L ⁻¹
Marzo	8,1	15,7	43,2	0,188	0,363
Junio	13,7	25,6	140,9	0,097	0,182

Fuente: Adams (1987).

Sin embargo, y como se ha comentado anteriormente la principal razón de la variación estacional de la absorción mineral de los cultivos, es ontogénica, en la que se incluye tanto el crecimiento y el desarrollo para la formación de diferentes tejidos y órganos, como la propia composición mineral de cada uno de ellos. Los cambios más importantes se producen como resultado de la transición del desarrollo vegetativo al reproductivo. La concentración tisular de nutrientes en los órganos generativos (frutos) es bastante diferente a la de los órganos vegetativos. En consecuencia, la distribución de los diferentes nutrientes en los órganos vegetativos y generativos no coincide con la compartimentación de la materia seca, lo que produce una variación significativa en la proporción de nutrientes extraídos por la parte vegetativa y por la generativa de la planta (Gianquinto et al., 2013). Así, para la mayoría de los cultivos hortícolas, el fruto presenta la mayor compartimentación de N, P y K, y la hoja de Ca y Mg (Magan, 2005;

Segura et al., 2009b; Contreras et al., 2012a; Segura et al., 2012; Contreras et al., 2013b).

Para la definición de un programa de fertilización y la interpretación de los resultados del análisis de tejidos, es importante conocer que la concentración de nutrientes en hojas y otros órganos varía con la edad fisiológica. En general, el contenido de N, P y K desciende con la edad de la planta, mientras que el de Ca, Mg, Mn y B a menudo aumentan. Por lo tanto, las concentraciones óptimas de nutrientes minerales son generalmente más bajas en plantas más viejas que en plantas más jóvenes (Bryson y Barker, 2002). Por otro lado, los niveles de nutrientes, en particular N, pueden incrementarse temporalmente en plantas adultas como el resultado de un aumento en la disponibilidad del nutriente en la zona radicular, producido por ejemplo por la aplicación de fertirrigación.

La reducción de la concentración de N en la planta con la edad de la misma ha sido ampliamente investigada (Le Bot et al., 2001; Lemaire et al., 2008) y se ha descrito una "curva de dilución del N", definiendo una relación negativa entre la concentración de N en el tejido (%) y la producción de materia seca de la planta ($t\ ha^{-1}$) que se recoge en la ecuación 1.

$$\%N = \alpha MS^{-\beta} \quad (1)$$

Donde:

α = porcentaje de N en la planta cuando la materia seca del cultivo es de $1\ t\ ha^{-1}$.

β = coeficiente de dilución que describe la relación de la disminución de la concentración de N con el aumento de la biomasa aérea.

La ecuación 1 es válida para plantas desarrolladas sin restricción de N.

El concepto de la curva de dilución del N representa la reducción progresiva de la absorción de N con el crecimiento de los cultivos. La relación entre la absorción de N del cultivo (AN) y la producción de materia seca (MS), con las dos cantidades expresadas en $kg\ ha^{-1}$, fue descrita por Gallardo et al. (2009) para un cultivo de tomate en ciclo de primavera en invernadero y se recoge en la ecuación 2.

$$AN = 0,0699 MS^{0,9016} \quad (2)$$

La importancia de la determinación de las extracciones de nutrientes realizadas por los cultivos *in situ* está reflejada en numerosos trabajos, y una muestra de la gran variación en la absorción de nutrientes que puede existir para un mismo cultivo dependiendo de las condiciones de desarrollo se recoge en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Nutrientes absorbidos (kg t^{-1} producida) por diferentes cultivos hortícolas.

Cultivo	N		P_2O_5		K_2O		Emilia-Romaña ^a			Almería ^b		
	Media	Rango	Media	Rango	Media	Rango	N	P	K	N	P	K
Judía Verde	6,7	1,3-9,9	2,4	1,0-6,0	7,2	3,3-17,0	7,5	2	6	7,6	1,0	9,8
Pepino	2,1	1,5-3,6	1,2	0,1-3,2	3,1	2,0-4,8	1,6	0,8	2,6	1,9	0,6	2,3
Berenjena	5,0	3,0-7,0	1,5	0,2-2,3	6,2	2,5-11,2	5,4	2,1	6	4,5	0,5	5,8
Melón	4,4	2,5-6,4	1,3	0,5-2,5	5,7	2,5-8,0	3	1,7	5	4,0	0,8	6,6
Pimiento	4,5	3,0-8,0	1,3	0,6-2,5	6,5	4,4-13,5	3,9	1	5	3,8	0,4	5,2
Tomate	3,5	2,0-7,4	1,0	0,6-2,0	6,2	3,5-13,2	2,5	1	4	2,5	0,5	3,6
Sandía	2,3	1,7-3,7	1,3	0,8-1,8	3,5	2,7-6,7	1,7	1,3	2,7	1,5	0,3	2,1
Calabacín	4,5	3,8-5,0	3,0	1,6-3,8	9,5	7,7-12,5	3,8	1,6	9	4,5	0,4	4,2

^a Determinadas en el noreste de Italia. ^b Determinadas en invernaderos del sureste de España.

Fuente: Adaptada de Gianquinto et al. (2013) y Segura et al. (2013).

2.1.2. Fertirrigación en cultivos hortícolas protegidos

La fertirrigación es una técnica generalizada en los cultivos protegidos, en muchas partes del mundo, incluyendo la mayoría de los países del Mediterráneo. Aunque la técnica de fertirrigación es considerada como la más eficiente en el uso de los fertilizantes, registrando importantes incrementos en el rendimiento de los cultivos (Kafkafi, 2005), los productores de invernaderos siguen determinando las dosis de aplicación de fertilizantes basándose en la propia experiencia. En la mayoría de los casos, esta práctica se traduce en la aplicación de dosis excesivas de nitrógeno, fósforo y potasio. Además, en algunos casos, se conjuga la aplicación excesiva de uno o más nutrientes con el aporte inadecuado de otros, lo que agrava las incidencias de toxicidades o deficiencias de nutrientes, dado lugar incluso a alteraciones multinutricionales (Gianquinto et al., 2013).

2.1.2.1. Fertirrigación nitrogenada

El nitrógeno (N) es el elemento mineral que la mayoría de las plantas requieren en mayor cantidad y es parte de muchos componentes de la célula vegetal, incluidos los ácidos nucleicos y aminoácidos (Marschner, 1995). Es absorbido por los vegetales tanto en forma de nitrato (NO_3^-) como de amonio (NH_4^+). El amonio es absorbido y utilizado generalmente por plantas jóvenes, mientras el nitrato es la principal fuente de nitrógeno utilizada durante el período de crecimiento (Sánchez, 2004). Por lo tanto, la deficiencia de nitrógeno inhibe rápidamente el crecimiento de la planta.

Numerosos son los trabajos que demuestran la respuesta productiva de diversos cultivos a la cantidad de N aplicada. Fundamentalmente se relaciona el incremento de las dosis nitrogenada con el aumento de la producción de fruto (Buzetti et al., 1993; Coelho et al., 2001; Gul et al., 2011; Yasuor et al., 2013).

El bajo coste de los fertilizantes nitrogenados y el drástico efecto que produce la aplicación de N en los rendimientos de los cultivos hortícolas intensivos ha generado un aporte excesivo de fertilizantes por parte de agricultores (Glass, 2003; Thompson et al., 2007). Por esta razón, en muchos sistemas agrícolas, una proporción considerable de fertilizantes nitrogenados se pierden desde la zona de la raíz al subsuelo, aguas subterráneas, ríos y océanos (Glass, 2003). La lixiviación de NO_3^- se produce en muchas áreas de producción de cultivos hortícolas donde las tasas de aplicación de N exceden la demanda del cultivo (Zhu et al., 2005; Thompson et al., 2007). Por ende, el N es un contaminante ambiental potencial y, por lo tanto, el aumento en la eficiencia de uso del N es fundamental para minimizar el impacto ambiental y conseguir la sostenibilidad del sistema agrícola (Gastal y Lemaire, 2002; Fageria y Baligar, 2005; Fageria et al., 2008; Masclaux-Daubresse et al., 2010). La mejora de la gestión del N se ha convertido en esencial en los últimos años debido al aumento de los niveles de nitrógeno en forma nitratos (N- NO_3) en las agua subterráneas, asociado con altas tasas de aplicación de fertilizantes nitrogenados a los cultivos (Del Amor, 2007).

Aplicar una cantidad suficiente de N es necesario para asegurar el crecimiento y desarrollo de la planta, siendo parte integral de la funciones y estructura de proteínas y cloroplastos (Barker y Bryson, 2007). La deficiencia de nitrógeno se ha estudiado en la mayoría de los cultivos hortícolas, mientras que el efecto de exceso de N no ha sido tan

ampliamente documentado (Stefanelli et al., 2010). Excesivas aplicaciones de N a menudo conducen a un aumento del crecimiento vegetativo en detrimento del desarrollo de la raíz o del fruto (Mengel et al., 2001; Elia y Conversa, 2012).

En cultivo de tomate desarrollado en invernadero, la aplicación de altas dosis de N puede reducir la producción de frutos, y disminuir la cantidad de azúcares con la consecuente pérdida de sabor (Stefanelli et al., 2010). La respuesta a la aplicación de nitrógeno en cultivo de pimiento ha sido ampliamente estudiada. Hartz et al. (1993) determinan que el incremento de 135 a 252 kg ha⁻¹ de N para cultivo de pimiento desarrollado al aire libre produce un aumento en el número de flores y rendimiento de fruto, dando lugar a producciones próximas a 50 t ha⁻¹. La intensificación de los modelos de producción de pimiento comúnmente practicados requiere una dosis de aplicación de nutrientes, entre los que se encuentra el N, mucho más elevada que los sistemas tradicionales de producción al aire libre. El nitrógeno en estos casos se aplica continuamente mediante fertirrigación, y las concentraciones medias aplicadas varían de 100 a 150 mg N L⁻¹ (7 y 11 mM), aplicando en un ciclo de cultivo de 750-900 kg N ha⁻¹ (Schon et al., 1994; Bar-Tal et al., 2001a, 2001b; Jovicich et al., 2004a, 2004b).

La respuesta del cultivo a la dosis de N aplicada y la eficiencia de uso del nutriente son criterios importantes para determinar las necesidades de N que aseguren el máximo rendimiento económico (Fageria y Baligar, 2005). El porcentaje de N absorbido por el cultivo, en relación al aplicado, es con frecuencia inferior al 50% (Fageria y Baligar, 2005; Thompson et al., 2007). Thompson et al. (2007) determinaron que en un 40% de los invernaderos del litoral de Almería, las aplicaciones de N eran 1,5 veces superiores a las extracciones realizadas por el cultivo y el doble en un 20% de los invernaderos.

Por lo tanto, existe un amplio margen de mejora que conllevaría una reducción de los costes de producción, y una conservación de la calidad ambiental (Fageria y Baligar, 2005). El uso de especies de plantas o genotipos eficientes en la absorción y uso de N puede facilitar la productividad del N y la sostenibilidad del sistema agrícola (Fageria y Baligar, 2005; Stefanelli et al., 2010). La influencia de la variabilidad genética en la eficiencia del uso de nitrógeno ha sido reconocida desde hace años (Smith, 1934). En el tomate, el genotipo mostró influencia en el uso y asimilación de N

(Ruiz y Romero, 1998). Los genotipos con alta eficiencia de uso de N se caracterizaron por presentar mayor acumulación de N-NO_3 en las hojas, alta actividad de la nitrato reductasa, y altos contenidos en nitrógeno orgánico y proteínas (Ruiz y Romero, 1998).

El interés del consumidor con respecto a la calidad de los productos hortícolas se ha incrementado en los últimos años (Stefanelli et al., 2010). Si bien, la calidad de un producto es un tema complejo, además de las características visuales, deben ser consideradas propiedades como la textura, el contenido de vitaminas y minerales, el sabor y otras características organolépticas (Gruda, 2005). Investigaciones recientes indican que altas tasas de aplicación de N puede tener efectos negativos sobre la calidad del fruto y el contenido de vitaminas en frutas y verduras (Stefanelli et al., 2010).

En los cultivos de raíz, un aporte elevado de N puede conducir a la reducción calidad sensorial. Por ejemplo, el contenido de azúcar puede verse reducido en cultivo de patata y remolacha azucarera cuando se aplican dosis excesivas de N (Mengel et al., 2001).

Los cultivos hortícolas, como el pimiento, son una excelente fuente de nutrientes bioactivos tales como la vitamina C, provitamina A (carotenoides), compuestos fenólicos, y potasio, estos parámetros que definen la calidad nutricional y la capacidad antioxidante de los frutos pueden verse afectados por la fertilización nitrogenada (Flores et al., 2004). En el tomate, Bénard et al. (2009) encontraron que una disminución de N-NO_3 de 12 a 4 mM reduce ligeramente el rendimiento del cultivo (7,5%) y mejora la calidad organoléptica del fruto mediante el descenso de acidez y el incremento de los sólidos solubles totales, sin embargo no encontraron efecto sobre el contenido de carotenoides.

2.1.2.2. Fertirrigación fosfórica

El fósforo (P) es un componente de ácidos nucleicos, fosfolípidos, fosfoproteínas, di nucleótidos y del adenosin trifosfato (ATP). Por lo tanto, el fósforo es necesario para los procesos como el almacenamiento y la transferencia de energía, la fotosíntesis, la regulación de algunas enzimas y el transporte de los hidratos de carbono (Marschner, 1995).

El P penetra por la raíz principalmente por difusión gracias a la existencia de un gradiente de concentración. Sin embargo, realiza movimientos a corta distancia en el suelo y debe estar cerca de la raíz para poder ser absorbido. Los factores del suelo, tales como el grado de humedad, la capacidad tampón o la temperatura, así como los factores de la planta, como la longitud de la raíz y el volumen radical, influyen en la absorción de P por las raíces. El fósforo es absorbido en forma de H_2PO_4^- o HPO_4^{2-} dependiendo del pH del medio de crecimiento y se encuentra presente en las células de la raíz y del xilema en niveles de 100-1000 veces mayores a los existentes en el suelo. La absorción de P es mayor en las etapas juveniles de desarrollo y disminuye conforme progresa la maduración de la planta (Marschner, 1995). El P influye en la floración de los cultivos, de forma que dosis elevadas de fósforo adelantan la floración, como demuestran Nawaz et al. (2012) en cultivo de tomate.

La movilidad del P en el suelo es baja (Kafkafi y Bar-Yosef, 1980). Sin embargo, los estudios realizados en riego localizado muestran un incremento en la movilidad de este elemento (Rauschkolb et al., 1976; Bar Yosef, 1977; O'Neill et al., 1979). El fósforo queda retenido en las proximidades del emisor de goteo y se desplaza horizontalmente, más que en profundidad, tanto en suelo de textura franco-arenosa como franco-arcillosa (Madrid et al., 1987). La mejora del desplazamiento de este elemento cuando se aplica por fertirrigación a la zona donde están concentradas las raíces absorbentes (Grobbelar y Lourens, 1975) da como resultado un señalado aumento de los contenidos de fósforo en hoja, lo que permite considerar una reducción del aporte de P (Lekchiri, 1983; Neilsen et al., 1995). León et al. (1987), en suelo de textura media, observan una migración del fósforo soluble, extraído con sondas de succión, dentro del bulbo a pesar del alto contenido de caliza del suelo. Así en suelos de textura arenosa, con aporte de P en fertirrigación se ha detectado aumentos de concentración de P a una profundidad de 30 cm como consecuencia de la movilidad del elemento desde la zona superficial a la más profunda con el agua de percolación (Llanderal et al., 2012).

La eficiencia de absorción de P es muy baja, ya que alrededor del 80-90% de P aplicado como fertilizante es retenido por las partículas del suelo (Jones, 1998), si bien cuando se utiliza fertirrigación esta eficiencia aumenta considerablemente (Mohammad, et al., 2004). Qin et al. (2011) cuantificaron la capacidad de los principales tipos de suelo de su zona de producción (Hexi Corridor, China) de suministrar P a los diferentes

cultivos hortícolas de invernadero y obtuvieron que, aunque los niveles en suelo eran elevados, era necesario complementar con fertirrigación fosfórica en mayor o menor medida dependiendo del cultivo desarrollado (calabaza, pepino, berenjena, tomate y pimiento) para mejorar la productividad. Bâth y Otabbong (2013) en cultivo de tomate en invernadero consiguen aumentar la disponibilidad de fósforo del suelo en un invernadero de tomate bajo producción ecológica con la adicción de ácido cítrico al suelo incrementando el rendimiento de la planta y la absorción de P y N.

Existen estudios recientes que evalúan la influencia de la fertirrigación fosfórica sobre la productividad de los cultivos hortícolas (Zhang et al. 2010a, 2010b, 2011; Liu et al., 2011, 2012; Conversa et al., 2013; Fontes et al., 2014) mostrando respuestas contradictorias, debido fundamentalmente a las condiciones de desarrollo de la experiencia y a que los niveles de fósforo presentes en la mayoría de los suelos agrícolas son muy elevados y estas altas concentraciones pueden disipar el efecto de la fertirrigación fosfórica.

Un claro ejemplo de la situación es recogido por Yan et al. (2013) que evalúan la situación actual de los niveles de fósforo en los sistemas de producción intensiva de hortalizas de China, concluyendo que hay una sobre fertilización de P tanto en invernadero como al aire libre. Estos autores cifran una dosis media por campaña de 571 kg P ha^{-1} en invernadero y de 117 kg P ha^{-1} al aire libre, mientras que la extracción de P realizada por los cultivos es de 44 y 25 kg P ha^{-1} respectivamente. Además, reflejan que el exceso del aporte de P ha llevado asociado una elevación de los niveles de P en suelo del orden de 179 (invernadero) y 100 mg P kg^{-1} (aire libre) en los primeros 20 cm de profundidad, apreciándose en algunos casos lixiviación de P, evidenciada por el aumento del P-Olsen en las capas más profundas del suelo (de 40 a 60 cm). Concluyen que la gran mayoría de los suelos utilizados para la producción de hortalizas presentan valores de P-Olsen que exceden del nivel crítico ($46\text{-}58 \text{ mg P kg}^{-1}$) para una producción óptima de hortalizas. Ante esta situación los autores remarcen la necesidad urgente de establecer políticas y estrategias innovadoras basadas en investigaciones científicas que mejoren las prácticas de manejo de nutrientes y consigan alcanzar la sostenibilidad del sistema de producción y al mismo tiempo proteger los recursos medio ambientales.

El efecto del P sobre la productividad de los cultivos ha sido ampliamente estudiado. Zhang et al. (2010a, 2011) obtuvieron que la dosis de fertirrigación fosfórica no afecta el desarrollo del cultivo de tomate debido a los elevados niveles de P en el suelo. Coincidiendo con estos autores, Liu et al. (2011, 2012) también en tomate, tras evaluar durante 4 años diferentes dosis de P (0, 30, 60 y 90 kg ha⁻¹ de P) no encontraron efecto de la dosis sobre la productividad del cultivo, si bien las dosis más elevadas de P aumentan la producción de biomasa aérea total y disminuyen la concentración de N en el tallo y la hoja. Conversa et al. (2013) estudiaron el efecto del nivel de fertirrigación fosfórica (0, 60 y 120 kg ha⁻¹ de P) sobre la producción y absorción de fósforo en cultivo de tomate encontrando que la fertirrigación P no tuvo ningún efecto sobre el crecimiento y rendimiento del cultivo.

A diferencia de los obtenido por Zhang et al. (2010a, 2011) y Liu et al. (2011, 2012), Fontes et al. (2014) encontraron una respuesta positiva en los rendimientos de tomate desarrollado en invernadero sin calefacción al incremento la fertirrigación fosfórica. Estos autores obtuvieron el mayor rendimiento (6,16 kg planta⁻¹, correspondiente a 10,3 kg m⁻²) con la aplicación de 9,72 g planta⁻¹ de P₂O₅. Además encontraron que la fertirrigación fosfórica modifica la concentración foliar de P, Mg y Fe, aumentando la de P hasta dosis de 14,22 g planta⁻¹ de P₂O₅, y las de Mg y Fe con la supresión del aporte de P.

Zhang et al. (2010b) evaluaron la respuesta del cultivo de pimiento al incremento de la dosis de P aplicada en fertirrigación durante tres años, obteniendo solo en uno de los años un aumento lineal de la producción con el incremento de las dosis de P en fertirrigación, no afectando las demás variables bioproductivas. Por el contrario, Pall et al. (2011) aumentaron el peso medio del fruto y el rendimiento del cultivo de pimiento al aumentar la aplicación de P hasta 30 kg ha⁻¹, también mejoraron la longitud del fruto y el número de frutos por planta hasta la aplicación de 60 kg P ha⁻¹.

Lima et al. (2014) estudiaron el efecto de diferentes dosis de P (0, 50, 100, 150 y 200 kg ha⁻¹ de P₂O₅) sobre la producción de berenjena (*Solanum melongena* L.) concluyendo que la dosis de 100 a 150 kg ha⁻¹ de P₂O₅ proporciona los mejores resultados. La aplicación de P tuvo efectos significativos sobre la mayoría de las

variables bio-productivas determinadas, a excepción de la altura de la planta, biomasa fresca aérea y el peso medio del fruto.

En lo que respecta a la calidad del fruto de tomate, Liu et al. (2011) encuentran que el incremento de las dosis de P a 60 kg ha^{-1} aplicada en fertirrigación aumenta el contenido de licopeno sin incrementar los sólidos solubles totales. Ghoname et al. (2012) estudiaron el efecto de las dosis de P (30, 60, 90 y 120 kg ha^{-1} de P_2O_5) sobre el crecimiento, producción e incidencia de la necrosis apical (blossom end rot; BER) en cultivo de pimiento obteniendo que el aumento de la dosis de P incrementa el crecimiento vegetativo, rendimiento de fruto, calidad del fruto (tamaño del fruto, sólidos solubles totales, acidez y vitamina C) y contenido nutricional (N, P, K y Ca). Sin embargo, dosis de P de 90 kg ha^{-1} no mostraban diferencias significativas con dosis de 120 kg ha^{-1} para la mayoría de los parámetros medidos. Además, el incremento de la dosis de P redujo notablemente los frutos con BER, debido probablemente a un efecto positivo sobre la absorción de agua y Ca.

Por otra parte, concentraciones elevadas de fosforo en la disolución de fertirrigación pueden ocasionar deficiencias de micronutrientes en la planta (Choi y Lee, 2012). Estas deficiencias inducidas por P se reflejan en la cantidad total de micronutrientes extraídos por la planta, pudiendo no observarse en la concentración tisular (mg kg^{-1} de peso seco) como documentan Choi y Lee (2012). Estos autores observaron una reducción en la cantidad total de micronutrientes absorbida por el cultivo de fresa y una clorosis acentuada al elevar la concentración de P en la disolución de fertirrigación (a 4 mM o 2 mM dependiendo de la variedad de fresa), sin embargo no descendieron las concentraciones tisulares de micronutrientes (Fe, Cu, Mn y Zn).

2.1.2.3. Fertirrigación potásica

El potasio (K) es esencial en la síntesis de proteínas y activación enzimática, altas concentraciones de K son necesarias para mantener la capacidad fotosintética, es un mediador osmótico en la expansión celular dirigiendo los movimientos de presión de turgencia, es fundamental en las relaciones hídricas, interviene en la estabilización del pH celular contrarrestando ácidos y aniones orgánicos, como Cl^- y SO_4^{2-} , además compite con el Na^+ en condiciones salinas (Marschner, 1995; Sánchez, 2004). Con un

aporte adecuado del mismo, aumenta el espesor de las paredes celulares, mejorando la resistencia a plagas y enfermedades (Sánchez, 2004).

El K^+ en las plantas juega un papel biofísico y bioquímico fundamental. Al estar cargado positivamente y ser tan abundante es un estabilizador de las moléculas cargadas negativamente como los ácidos nucleídos y proteínas. Por otro lado, el aparato fotosintético necesita K^+ , y la deficiencia de este reduce la actividad fotosintética, el contenido en clorofila y la traslocación del carbono fijado (Hartt, 1969; Pier y Berkowitz, 1987). El K^+ presenta una alta movilidad en las plantas, traslocándose entre raíz y parte aérea por el xilema y el floema, y en la parte aérea de unas hojas a otras (Karley y White, 2009). El K^+ se acumula en las vacuolas, lo que permite los movimientos de la planta tales como la apertura y cierre de estomas, el movimiento de las hojas y otros tropismos de las plantas que se producen por la presión de turgor generada por el K^+ (Maathuis et al., 1996; Philippar et al., 1999). La presión osmótica originada por la acumulación de K^+ es también utilizada para la expansión celular y de las hojas (Maathuis et al., 1996; Ruan et al., 2001; Elumalai et al., 2002). El K^+ también es considerado un osmolito compatible que contribuye al mantenimiento del estado hídrico de la planta, lo que es fundamental en la mayoría de estreses abióticos (Mahouachi et al., 2006)

Gran parte del K^+ se mueve en el suelo lentamente por difusión, por lo que en plantas de crecimiento rápido se necesita la aplicación de fertilizantes potásicos para mantener niveles altos en forma asimilable. La rápida absorción y crecimiento de la planta puede reducir la concentración de K^+ alrededor de la superficie radical. Altas concentraciones de K^+ , y alta humedad y temperatura, aumentan el movimiento de K^+ desde el suelo a la raíz y aseguran niveles adecuados para mantener el crecimiento vegetal, siendo ascendente la principal dirección de transporte en los tejidos del xilema hacia los tejidos jóvenes y la redistribución es desde las hojas viejas hacia las más jóvenes (Marschner, 1995).

El potasio se absorbe como catión K^+ en cantidades superiores a la mayoría de los elementos, exceptuando el N. Las plantas usualmente absorben la mayoría del K^+ durante la primera mitad de su crecimiento, aunque hay periodos de alta demanda, como son la floración y desarrollo del fruto (Marschner, 1995). El K^+ y el Ca^{2+} son necesarios

en cantidades importantes para mantener la integridad y funcionalidad de las paredes celulares. La concentración de K en disoluciones nutritivas recomendadas para diversos cultivos varía entre 5,0 a 8,0 mM (Urrestarazu, 2004).

En cultivos con gran demanda de K, como son la mayoría de los cultivos hortícolas de invernadero, la producción y la calidad de fruto están estrechamente relacionadas con la concentración de potasio aplicada al cultivo, consiguiéndose con una adecuada nutrición potásica el aumento de los rendimientos, el tamaño de fruto, y la producción de biomasa (Geraldson, 1985; Kanai et al., 2007; Contreras et al., 2007; Segura et al., 2009a; Segura et al., 2009b; Contreras et al., 2012a, 2012b; Segura et al., 2012; Contreras et al., 2013a, 2013b; Contreras et al., 2014a; Contreras y Segura, 2014).

En lo que respecta a la producción, numerosos son los trabajos que muestran como la fertirrigación potásica incrementa la productividad de los cultivos. Así Demiral y Köseoglu (2005) determinan en cultivo de melón tipo Galia desarrollado en invernadero que la aplicación de una dosis de 300 mg L⁻¹ de K es suficiente para obtener una buena producción de fruto. Gratieri et al. (2013) evaluaron el efecto de la concentración de K en fertirrigación (4, 6, 8 y 10 mmol L⁻¹) para plantas de melón creciendo en fibra de coco y observan un incremento de producción al aumentar la concentración de K. Por otra parte, El-Nemr et al. (2012) determinan, en dos cultivares de tomate desarrollados en arena, la mayor producción de fruto con dosis de 350 mg L⁻¹ de K, independientemente del cultivar.

El tipo de fertilizante utilizado para el aporte de K no parece influir en los rendimientos del cultivo, como evidencian numerosos trabajos. Deng et al. (2010) en cultivo de patata encuentran una respuesta positiva en la producción al aporte de diferentes tipos de fertilizantes potásicos, no mostrando diferencia entre la fuente de potasio aplicada (KCl, K₂SO₄ y KNO₃). Resultados similares fueron obtenidos por Chapagain y Wiesman (2004) en cultivo de tomate en invernadero que encontraron que el tipo de fertilizante (KNO₃, KCl, y KCl·MgCl₂) utilizado para el aporte de K no influye en la productividad del cultivo, coincidiendo con lo observado por Chapagain et al. (2003) que tampoco encontraron efecto en la producción, ni en el crecimiento de la planta de tomate en invernadero con la utilización de dos fuentes de K (KNO₃ y KCl) independientemente de la proporción.

La calidad de fruto en los cultivos hortícolas está estrechamente relacionada con la concentración de K aplicada al cultivo, y así lo refleja la extensa investigación realizada para determinar la influencia de este nutriente sobre los diferentes parámetros de calidad de fruto (Roorda van Eysinga, 1966a, 1966b; Sonneveld y Voogt, 1981; Adams, 1992; Bergmann, 1992; Chapagain y Wiesman, 2004; Dorais et al., 2001, 2008; Oded y Uzi, 2003). Lin et al. (2004) encontraron que el aumento de los niveles de potasio genera un incremento significativo en la concentración de azúcares totales, sólidos solubles totales, ácido glutámico, ácido aspártico, alanina, y acetato volátil en los frutos de melón. En el tomate, se ha documentado que tanto la acidez como el contenido en azúcar están con frecuencia relacionados con la aplicación de K, y que estos factores no solo influye en el dulzor del fruto, sino también en otras características del sabor (Chapagain y Wiesman, 2004). Por otro lado, Yagmur et al. (2004) encontraron que las dosis de fertilización de K no afectan los parámetros de pH y color. Sin embargo, otros autores (Asri y Sönmez, 2010; Majid et al, 2010) determinan que un aumento de los niveles de potasio incrementan la acidez valorable, sólidos solubles totales, contenido de vitamina C, peso medio de los frutos y también el pH del jugo de fruto. El rajado de los frutos de pimiento pueden verse reducido por el aumento de los niveles de K (Kreij et al., 1999).

Además, el crecimiento vegetativo, la tasa de fotosíntesis neta y el contenido de clorofila pueden verse incrementados con el aumento de los niveles de K (Zhang et al., 2002; Lin y Danfeng, 2003).

El aumento en la aplicación de K lleva asociado un incremento de la concentración total de iones de la disolución (aumento de la CE), con lo cual se incrementa la presión osmótica, que en sí mismo tiene un claro efecto sobre el rendimiento y la calidad de los frutos (Sonneveld y van den Burg, 1991). En cultivo de melón cv. Galia, desarrollado en invernadero en la costa Mediterránea de Turquía, Demiral y Köseoglu (2005) obtienen que el incremento de las dosis de K hasta 600 mg L^{-1} produce un incremento en la calidad del fruto, aumentando los sólidos solubles totales y la firmeza. Por otra parte el tipo de fertilizante utilizado para el aporte de K también puede tener influencia sobre la calidad de fruto y así lo reflejan Chapagain y Wiesman (2004) que encontraron que el tipo de fertilizante (KNO_3 , KCl , y $\text{KCl}\cdot\text{MgCl}_2$) utilizado para el aporte de K tiene influencia en la calidad del fruto tomate,

presentando el KCl y la combinación de este con KCl·MgCl₂ una mejora en la apariencia y cualidades del fruto aumentando la firmeza del fruto y la frescura del cáliz y reduciendo el número de frutos con pudrición y manchas.

En tomate, Liu et al. (2011) obtienen que tanto la producción como la calidad de fruto puede ser mejorada con la adicción de fertirrigación potásica, así, el incremento de la dosis aplicada de 0 a 200 kg K ha⁻¹ aumenta la producción comercial de fruto un 10% y la total un 9%, pero reduce el tamaño del fruto un 3%. El aumento de la dosis de K de 200 a 600 kg ha⁻¹, sin embargo, no afecta los rendimientos ni el tamaño del fruto, si bien se produce un aumento lineal de los sólidos solubles totales con el incremento de las dosis de K. Además del efecto sobre los sólidos solubles del fruto de tomate, el incremento de la dosis potásica en fertirrigación aumenta el contenido de vitamina C, la acidez valorable y el pH en el jugo del fruto de tomate (El-Nemr et al., 2012)

Çolpan et al. (2013) también estudiaron el efecto del potasio sobre la producción y los componentes de calidad de fruto de tomate desarrollado en Turquía (Antalya), las dosis ensayadas fueron 0, 40, 80, 120 y 160 kg ha⁻¹ de K₂O. Según los resultados, la mayor producción de fruto (195,7 t ha⁻¹) se obtuvo con la aplicación de 120 kg ha⁻¹ K₂O. Dependiendo de la dosis de aplicación, el diámetro de tallo de la planta varió desde 14,22 hasta 14,99 mm, la longitud de la planta de 173,05 a 181,69 cm, el diámetro de fruto de 70,33 a 73,84 mm, el número de frutos por planta de 29,20 a 34,57, el peso del fruto de 160,45 a 185,63 g, la resistencia a la penetración de 2,45 a 2,99 kg cm⁻², el pH de 5,10 a 5,20 y el contenido en sólidos solubles totales de 3,67 a 3,97 ° Brix. Kiriwa y Nukaya (2013) en cultivo de tomate desarrollado en lana de roca encontraron una mejora del color así como del contenido en licopeno y fitoeno del fruto de tomate con el incremento de la fertirrigación K, existiendo además una correlación lineal negativa entre el K y la incidencia de manchas amarillas en fruto. Además, Kazemi (2014) concluye que la aplicación de potasio disminuye los frutos de tomate con BER e incrementa la concentración foliar de N, P y K, el contenido en clorofila y la actividad de la nitrato reductasa.

Asri y Sönmez (2010) encontraron que en cultivo de tomate desarrollado sobre cultivo sin suelo el incremento de las dosis aplicadas en fertirrigación (150, 300 y 450

mg L⁻¹) eleva la acidez valorable, el contenido total de sólidos solubles y el pH del jugo del fruto, no afectando el ácido ascórbico, diámetro y color del fruto.

Javaria et al. (2012) estudiaron el efecto de diferentes dosis de potasio sobre los atributos químicos y sensoriales del tomate, las dosis ensayadas fueron 0, 75, 150, 225, 300, 375 y 450 kg ha⁻¹ de K₂O, obteniendo que los sólidos solubles totales, azúcares y acidez valorable aumentan significativamente con el aumento de las dosis de potasio, a diferencia del pH que disminuyó. Del mismo modo, el contenido en licopeno, vitamina C y los sólidos solubles totales aumentaron significativamente con el incremento de la aplicación de K₂O hasta 375 kg, registrando un descenso cuando la dosis se eleva a 450 kg ha⁻¹ de K₂O. Existió una relación significativa entre las dosis de K y el color (tanto de la piel como de la pulpa) la firmeza, nitidez, dulzor, acidez y sabor. Además, determinaron correlaciones lineales positivas entre el sabor y el contenido en azúcar, los sólidos totales y la acidez titulable; entre el enrojecimiento de la piel y el contenido en licopeno; y entre la firmeza y los sólidos totales, observándose una correlación negativa entre sabor y pH. Se concluyó que el aumento de la concentración de K produjo una mejora de parámetros de calidad de fruto de tomate y la aplicación de 375 kg ha⁻¹ de K₂O fue la dosis más adecuada para conseguir unos frutos de alta calidad.

En cultivo de melón, Tang et al. (2012) evaluaron los efectos de los niveles de potasio en la calidad del fruto en dos cultivares desarrollados en invernadero y cultivo sin suelo. Evaluaron cuatro niveles de potasio (0, 117, 234, y 351 mg L⁻¹ de K) obteniendo que niveles de 234 y 351 mg L⁻¹ de K mejoraran la concentración de sólidos solubles totales, sacarosa, contenido de K, y componentes volátiles de acetato en el fruto, lo que debería mejorar el sabor y el aroma de melón.

Lester et al. (2010) realizaron una revisión en la que recogen el impacto de la nutrición potásica sobre la calidad del fruto de melón, recopilando los efectos derivados de las dosis aplicadas tanto en suelo como en fertirrigación, así como la influencia de la fuente fertilizantes de K, concluyendo que numerosos estudios han demostrado consistentemente que el tipo de fertilizante de K puede mejorar los atributos de calidad del fruto, clasificándolos por efectividad en el siguiente orden: K₂SO₄ ≥ KCl > no aporte de K > KNO₃. Además concluyen que cuando el K se aplica disuelto en agua, ya sea en

fertirrigación o en aplicaciones foliares, el incremento de la calidad del fruto es generalmente mayor que cuando se aplica directamente al suelo, sin disolución.

En cultivos desarrollados en sustrato el incremento de la concentración de K en la disolución de fertirrigación puede ocasionar un aumento del pH y CE del sustrato, y así lo documentan Gratieri et al. (2013) en cultivo de melón desarrollado en fibra de coco.

Asao et al. (2013) observan un descenso del contenido de K en el fruto de melón al reducir la dosis de K aplicada en fertirrigación en la etapa de desarrollo de fruto y recolección, sin encontrar mermas en la producción de fruto.

2.2. SALINIDAD

La salinidad es uno de los principales factores que hay que considerar en la calidad de un agua de riego (Ayers y Westcot, 1985; Rhoades et al., 1992; Prats y Melgarejo, 2006).

El término salinidad del agua se define como la concentración total de las principales sales inorgánicas (Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , HCO_3^- , SO_4^{2-} y Cl^-) disueltas en el agua de riego, drenaje y aguas subterráneas (Rhoades et al., 1992), donde la concentración individual de cada catión y anión se puede expresar en volumen de agua como mmolc L^{-1} o como mg L^{-1} . Así, la salinidad del agua es la suma de la concentración de cationes y aniones, denominado sólidos disueltos totales (SDT) y normalmente se expresa en mg L^{-1} , es una medida directa de la salinidad del agua.

La salinidad del agua también se puede determinar de forma indirecta, mediante la CE (Shannon y Grieve, 1999) y se expresa en deciSiemens por metro (dS m^{-1}) a 25 °C (Urbano, 1992; Tanji et al., 2008). La CE se puede relacionar directamente con la actividad de las sales disueltas, aumentando linealmente a medida que se eleva la concentración salina (Urbano, 1992; Tanji et al., 2008). La relación entre los SDT y la CE del agua se recoge en las siguientes expresiones:

$$\text{SDT (mg L}^{-1}\text{)} = 640 \times \text{CE (dS m}^{-1}\text{)} \text{ cuando la CE del agua es inferior a } 5 \text{ dS m}^{-1}$$

$$\text{SDT (mg L}^{-1}\text{)} = 800 \times \text{CE (dS m}^{-1}\text{)} \text{ cuando la CE del agua es superior a } 5 \text{ dS m}^{-1}$$

Los valores de conductividad eléctrica se expresan siempre a 25 °C para facilitar la comparación de lecturas en distintas condiciones climáticas. La costumbre generalizada de utilizar la CE como índice de salinidad se fundamenta en el concepto de que, como una buena primera aproximación, las plantas responden en primer lugar a la concentración total de sales, y posteriormente a las concentraciones o proporciones de cada sal individualmente (Rhoades et al., 1992).

La composición del agua salina varía según las regiones. Los cationes dominantes son generalmente Na^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} , mientras los aniones dominantes son Cl^- , SO_4^{2-} y HCO_3^- (Grattan y Grieve, 1999). El K^+ y el carbonato (CO_3^{2-}) generalmente son muy bajos en el agua de riego y en la solución del suelo, ya que su concentración es controlada por interacciones del pH y la fase sólida (Läuchli y Grattan, 2007).

Generalmente la salinidad en el suelo o solución nutritiva es debida al cloruro de sodio (NaCl), ya que es la sal más soluble y ampliamente distribuida (Munns y Tester, 2008). El agua disuelve fácilmente las sales cristalinas por hidratación de sus componentes iónicos, la red cristalina de NaCl se interrumpe cuando las moléculas de agua se agrupan alrededor de los iones Cl^- y Na^+ (Nelson y Cox, 2008) suspendiendo los iones en solución y pudiendo ser absorbidos por la planta. La absorción de estos iones depende de la especie o genotipo, nivel de salinidad y la composición química de la solución del suelo (Niu y Rodríguez, 2008). Para la mayoría de los cultivos la absorción de Cl^- es más alta que la de Na^+ (Sonneveld y Voogt, 2009).

2.2.1. Interacción con el desarrollo del cultivo

El principal efecto de la salinidad en las plantas es la reducción del crecimiento, medido generalmente por la acumulación de materia seca, o la tasa de crecimiento relativo (Romero-Aranda et al., 2001; Caraciolo et al., 2002; Wu y Dodge, 2005). Esta reducción del crecimiento es producida por un descenso de la altura y peso de la parte aérea de la planta, así como una reducción del diámetro del tallo (Sonneveld y Voogt, 2009). En definitiva la salinidad reduce el tamaño de las plantas.

La salinidad inhibe el crecimiento de las plantas por tres vías diferentes (Greenway y Munns, 1980; Läuchli y Epstein, 1990; Grattan y Grieve, 1999; Munns, 2005; Munns y Tester, 2008):

- i) Disminuyendo el potencial hídrico del medio, restringiendo así la absorción de agua por las raíces (efecto osmótico).
- ii) Aumentando la absorción de iones salinos específicos, que pueden acumularse en los tejidos en concentraciones que lleguen a ser tóxicas e induzcan desórdenes fisiológicos (toxicidad por ión específico).
- iii) Modificando la absorción de los nutrientes esenciales y produciendo desequilibrios nutricionales al existir concentraciones elevadas de iones salinos.

Como consecuencia de estos efectos primarios, ocurren otros estreses secundarios, como el daño oxidativo o estrés oxidativo, causado por el desequilibrio entre la producción de especies reactivas de oxígeno y la capacidad de la planta de detoxificar rápidamente los reactivos intermedios o reparar el daño resultante, y el desbalance hormonal (Mittova et al., 2004). El grado por el cual un mecanismo u otro afecta a la planta depende de muchos factores, incluyendo la especie, el genotipo, la edad de la planta, la concentración del ión, la composición de la solución salina, el órgano afectado (Läuchli y Grattan, 2007) y tiempo de exposición (Caraciolo et al., 2002; Munns, 2005), así mismo, la severidad del efecto de la salinidad en los cultivos también depende de las interacciones ambientales, tales como humedad relativa, temperatura y radiación (Shannon et al., 1994). Los daños por salinidad son más evidentes bajo calor, sequía y viento, que en frío y ambiente húmedo (Fox et al., 2005; Niu et al., 2007).

Las plantas sufren una serie de cambios característicos desde que se inicia el estrés por salinidad (Munns, 2002). Los cambios se producen en diferente escala de tiempo durante el desarrollo de la planta. Para entender estas diferencias temporales en la respuesta a la salinidad por parte de las plantas, Munns (2002, 2005) desarrolló el concepto de "respuesta del desarrollo vegetativo del cultivo a la salinidad en dos fases" (Figura 2.2). La primera fase de la reducción del crecimiento ocurre rápidamente (en minutos) después de la exposición a la salinidad. Esta respuesta se debe a los cambios osmóticos producidos en el entorno de la raíz que causan cambios en las relaciones entre las células y el agua (efecto osmótico). El segundo efecto es mucho más lento, presentándose a los días, semanas o meses, y es el resultado de la acumulación de sal en las hojas, principalmente en las hojas más viejas, que deriva en la toxicidad por salinidad en la planta (es decir, efecto ión específico).

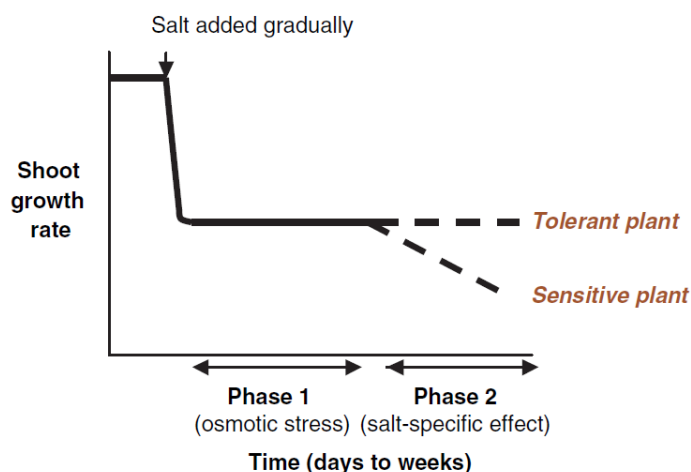


Figura 2.2. Esquema de la respuesta del desarrollo vegetativo de un cultivo a la salinidad en dos fases, para genotipos que difieren en el rango en el cual alcanzan los niveles tóxicos de sal en hojas (Munns, 2005).

Basándose en el concepto de dos fases, en la primera fase, la reducción del crecimiento inicial, tanto en las plantas tolerantes como en las sensibles a la salinidad, es causada por un efecto osmótico de las sales presentes en el medio que rodea a las raíces. En cambio, en la segunda fase, la respuesta de una especie o genotipo sensible a la salinidad difiere de una tolerante por su incapacidad para evitar la acumulación de sal en las hojas hasta niveles tóxicos (Munns et al., 2006).

Por lo tanto, el efecto de la salinidad en las plantas se diferencia entre el efecto producido por el estrés osmótico y los específicos (Sonneveld y Voogt, 2009).

2.2.1.1. Efecto osmótico

El efecto osmótico está relacionado con la concentración total de sales presentes en solución, independientemente de la especie de planta cultivada. Al aumentar la concentración de sales en la solución disminuye el potencial osmótico, lo cual tiende a reducir la absorción de agua por las raíces de la planta y reduce el crecimiento (Munns, 2002). El efecto osmótico inicialmente reduce la capacidad de la planta para absorber agua. Este efecto es similar al estrés hídrico y muestra pequeñas diferencias genotípicas. Varios minutos después de la primera disminución del crecimiento foliar, hay una recuperación gradual de la tasa de crecimiento hasta que se alcanza un nuevo estado de

equilibrio, que depende de la concentración de sal en el entorno de la raíz (Munns, 2002). Las plantas tienen que gastar más energía para extraer agua de la disolución de un suelo salino que de la disolución de un suelo no salino (TANJI et al., 2008). Además, las plantas pueden desarrollar un potencial osmótico positivo cuando existe una concentración de iones alta en el entorno de la raíz que causa que el agua fluya desde la raíz al suelo (Munns, 2002). El estrés osmótico también puede conducir al cierre de los estomas para restringir la pérdida de agua, y por lo tanto, puede provocar una disminución en la tasa de difusión y fijación fotosintética de CO_2 , además de limitar la absorción pasiva de iones por la raíz (Flexas et al., 2004, 2008; Robinson et al., 2007).

Estos efectos conllevan a que las plantas en condiciones de salinidad produzcan menos hojas y de menor tamaño, disminuyendo la relación entre el área foliar y el área foliar específica (Sharon et al., 2005), además de una reducción en la longitud y masa de la raíz, tallo y parte aérea, así como materia fresca y seca, y la disminución de la relación parte aérea y raíz (Munns y Termaat, 1986; Shannon y Grieve, 1999). También registran retrasos en la floración, menor producción de flores y semillas más pequeñas y estériles (Mane et al., 2011b).

2.2.1.2. Efecto por ión específico

El estrés ocasionado por ión específico se desarrolla con el tiempo, cuando las plantas acumulan gradualmente en los tejidos iones cloruro y sodio a concentraciones tóxicas (Munns, 2002).

El cloro es un nutriente esencial para las plantas. Su forma iónica común es Cl^- . Es indispensable para el desarrollo de la planta, ya que actúa en la fotosíntesis, transporte de cationes, apertura y cierre de estomas y división celular. Las plantas lo requieren en pequeñas cantidades ($0,5 \text{ mmolc L}^{-1}$ en la solución del suelo, y 1 g kg^{-1} de peso seco) siendo tóxico a concentraciones elevadas. El cloruro es absorbido por las plantas en forma activa y su movimiento de las raíces a las hojas es rápido, siempre acompañando a cationes. Las plantas pueden absorber entre 10 y 100 veces más Cl^- del que necesitan. Se concentra sobre todo en las hojas, pero se puede encontrar en concentraciones relativamente altas en otras partes de la planta (Marschner, 1995; Munns y Tester, 2008).

Por su parte, el sodio en el agua se presenta como ión Na^+ , no es considerado un nutriente esencial para la mayoría de las plantas, sin embargo, se encuentra involucrado en la regulación osmótica. Muchas plantas cuentan con mecanismos que reducen la absorción y la translocación del sodio a las hojas, por lo que no es común que aparezcan síntomas de toxicidad en éstas, ya que se acumula en tallos y raíces (Marschner, 1995; Munns y Tester, 2008). Las raíces tienden a mantener niveles de NaCl bastante constantes en el tiempo, y pueden regular los niveles de NaCl excretándolo al suelo o transportándolo a los tallos (Tester y Davenport, 2003).

La toxicidad por cloro se manifiesta de forma general como un bronceado ligero y coloración amarillenta en la punta de la hoja que deriva en una necrosis general, mientras que la toxicidad por Na^+ se inicia como un amarillamiento de los márgenes, manchas necróticas internerviales (Marschner, 1995), seguida de una necrosis progresiva (Ferguson y Grattan, 2005).

Para la mayoría de las especies, el Na^+ alcanza una concentración tóxica antes que el Cl^- , ya que a concentraciones mayores de 100 mM de Na^+ a nivel citosólico en hoja afectan los procesos bioquímicos y fisiológicos (Serrano, 1996), mientras que en raíz las concentraciones son del orden de 10 a 30 mM (Tester y Davenport, 2003). La concentración tóxica de Cl^- es menos conocida. Algunas especies leñosas (como los cítricos y la vid) parecen ser más susceptible a la toxicidad por Cl^- que los cultivos herbáceos (Gueta-Dahan et al., 1997; Munns y Tester, 2008). Por lo tanto, los estudios más recientes sobre la toxicidad por el ión específico se centran en el transporte de Na^+ .

La toxicidad por salinidad se produce principalmente en las hojas más viejas, ya que al estar transpirando durante un mayor período de tiempo, va acumulando Na y Cl produciendo una elevada concentración de sal que deriva en la pérdida de las hojas. Las lesiones y la senescencia de la hoja se deben probablemente a que la elevada concentración de sal en la hoja excede la capacidad de compartimentación de la sal en las vacuolas, causando una acumulación en el citoplasma hasta niveles tóxicos (Munns y Termaat, 1986; Munns, 2002, 2005; Munns et al., 2006). La velocidad con la cual la planta pierde hojas y por lo tanto reduce el área fotosintéticamente activa determina la supervivencia de la misma. Si las hojas nuevas se producen a un ritmo superior a la senescencia de las hojas viejas puede haber suficientes hojas fotosintéticamente activas

para que la planta florezca y fructifique, aunque el número de hojas se haya reducido. Sin embargo, si la velocidad de senescencia de las hojas es mayor que el desarrollo de hojas nuevas, la planta no puede sobrevivir el tiempo suficiente para suministrar los fotoasimilados necesarios a los órganos reproductivos y producir semillas.

El incremento de las concentraciones de Na^+ y Cl^- en la solución del suelo o sustrato conlleva a un aumento de la absorción de estos elementos por la planta (Sonneveld y Voogt, 2009). Altas absorciones de Na^+ y Cl^- compiten con la absorción, disponibilidad y transporte o distribución dentro de la planta de iones como K^+ , Ca^{2+} , NO_3^- y PO_4^- produciendo toxicidades o desordenes nutricionales (Grattan y Grieve, 1999; Hu y Schmidhalter, 2005). Así, varios autores documentan que el incremento de la concentración de NaCl induce aumento de Na^+ y Cl^- y descenso del nivel de K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} en los tejidos de un gran número de plantas (Pérez-Alfocea et al., 2000; Khan et al. 2000; Valdez-Aguilar et al., 2009).

2.2.2. Tolerancia a la salinidad

La tolerancia a la salinidad es la capacidad de la planta de crecer y completar su ciclo de vida a altas concentraciones de NaCl o con asociación de otras sales, en la zona de la raíz, sin efectos adversos significativos (Shannon y Grieve, 1999). Esta tolerancia se diferencia entre especies: halófitas son capaces de completar su ciclo de vida en 200 mM NaCl o más, mientras que las glicófitas son dañadas con un décimo de esta concentración (Flowers y Colmer, 2008). La tolerancia a la salinidad de una planta varía notablemente con las especies o entre cultivares de una especie (Cabrera, 2003; Niu y Cabrera, 2010).

La tolerancia a la salinidad puede definirse en base a distintos enfoques. Bernstein (1963) define la tolerancia como la capacidad de una planta de ajustar su potencial osmótico con una reducción mínima de crecimiento, y Levitt (1980) asocia la tolerancia con la ausencia de efectos negativos sobre el crecimiento de las plantas que acumulan sales en sus tejidos. Maas (1986) considera que la tolerancia se puede analizar desde tres puntos de vista:

- (1) la aptitud para sobrevivir en condiciones salinas,
- (2) el rendimiento absoluto en condiciones salinas y
- (3) el rendimiento en condiciones salinas relativo al obtenido en condiciones no salinas.

El enfoque (1) puede ser útil en programas de mejora genética, pero su interés económico es irrelevante. Por el contrario, el enfoque (2) puede ser el más apropiado para el agricultor por ser el que proporciona un mayor rendimiento económico, pero limita la comparación entre cultivos o variedades porque las producciones no se expresan en términos equivalentes y dependen del ambiente en que se desarrollan. Finalmente el enfoque (3) es el que se utiliza comúnmente para expresar tolerancia a la salinidad, y es el adoptado para generar las tablas de tolerancia de los cultivos a la salinidad (Maas y Hoffman, 1977; van Genuchten, 1983; Maas, 1990), ya que permite comparar cultivos cuyas producciones se expresan en unidades diferentes y, en principio, es menos sensible a las variables espacio y tiempo.

El modelo clásico de tres rectas propuesto por Maas y Hoffman (1977) define como índice de tolerancia a la salinidad, la CE umbral [CEu = conductividad eléctrica del suelo o del agua de riego a partir de la cual desciende el rendimiento máximo del cultivo obtenido en condiciones no salinas] y la pendiente ($b = \text{descenso del rendimiento por incremento unitario de la salinidad por encima de la CE umbral}$) (Figura 2.3).

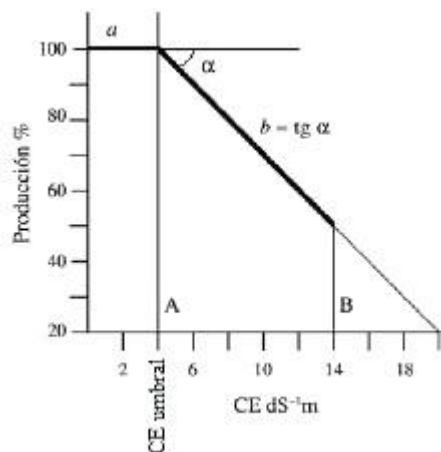


Figura 2.3. Representación del modelo propuesto por Maas y Hoffman (1977) para expresar la tolerancia a la salinidad de los cultivos.

Aunque este modelo es el más utilizado debido a su sencilla expresión matemática y a la obtención de ajustes generalmente satisfactorios, la CEu es muy dependiente del ambiente y, en función de la distribución de las observaciones experimentales, tanto su determinación como la de “b” pueden estar afectadas por un grado de error considerable (Shannon, 1997).

El modelo curvilíneo de respuesta de los cultivos a la salinidad propuesto por Van Genuchten (1983) define como índices de tolerancia la CE₅₀ (conductividad eléctrica del suelo o del agua de riego para la que la producción desciende el 50 %) y la constante “p” (constante empírica que afecta a la forma de la curva) (Figura 2.4).

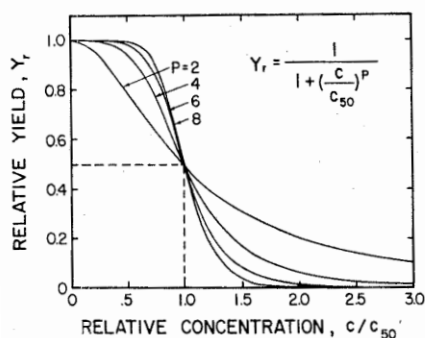


Figura 2.4. Representación gráfica del modelo curvilíneo de respuesta de los cultivos a la salinidad propuesto por Van Genuchten (1983).

Royo et al. (1991) concluyeron que la CE₅₀ es el índice más consistente para evaluar la tolerancia a la salinidad de los genotipos de cebada analizados.

Siguiendo el modelo clásico propuesto por Maas y Hoffman (1977), Ayers y Westcot (1985) recogen las tolerancias de diferentes cultivos entre los que se incluyen los cultivos hortícolas (Tabla 2.5). Si bien, especifican que la tolerancia absoluta de los cultivos variará dependiendo del clima, condiciones de suelo y de las prácticas culturales. De ahí la importancia de determinar la respuesta de los cultivos a la salinidad para unas condiciones específicas de desarrollo.

Tabla 2.5. Tolerancia de diferentes especies hortícolas a la salinidad del agua de riego (CE_a; Conductividad eléctrica del agua) según Ayers y Wescot (1985).

	Pérdida de producción		
	0%	10%	50%
Cultivo	CE _a (dS m ⁻¹)		
Fresa	0,7	0,9	1,7
Judía verde	0,7	1,0	2,4
Pimiento	1,0	1,5	3,4
Berenjena	0,7	1,7	5,5
Melón	1,5	2,4	4,6
Pepino	1,7	2,2	4,2
Tomate	1,7	2,3	5,0
Calabacín	3,1	3,8	6,7

La tolerancia se ve afectada por las condiciones climáticas, tipo de suelo o sustrato y manejo del riego (Niu y Cabrera, 2010). Aunque la tolerancia de un cultivo se basa en la productividad obtenida, la comprensión de cómo afecta la salinidad al desarrollo vegetativo o reproductivo es importante para establecer estrategias de gestión que pueden reducir al mínimo el estrés en momentos críticos (Läuchli y Grattan, 2007).

Munns y Tester (2008) hacen una revisión de los mecanismos fisiológicos y moleculares de tolerancia al estrés por salinidad a nivel de célula, de órgano, y de toda la planta. De la revisión se puede concluir que la adaptación de las plantas a la salinidad es de tres tipos: tolerancia al estrés osmótico, exclusión de Na⁺ o Cl⁻, y tolerancia del tejido a la acumulación de Na⁺ o Cl⁻.

2.2.2.1. Mecanismos que contribuyen a la tolerancia a la salinidad

Existe una gran variedad de mecanismos que contribuyen a la tolerancia a la salinidad, Parida y Das (2005) y Munns y Tester (2008) los resumen en: a) control de la absorción de iones por las raíces y transporte hacia las hojas, b) exclusión selectiva de iones, compartimentación de iones a nivel celular y de toda la planta, c) síntesis de solutos compatibles, d) cambios en la vía fotosintética y alteración en la estructura de la

membrana, e) inducción de enzimas antioxidantes para limpiar los radicales libres de oxígeno e inducción de hormonas en la planta.

a) Control de la absorción de las raíces y transporte hacia las hojas

Las plantas regulan el balance iónico para mantener su metabolismo en condiciones normales, restringiendo la absorción y translocación de iones tóxicos como Na^+ y Cl^- y manteniendo o incrementando la absorción de iones que requiere la planta metabólicamente como K^+ . Esto es posible mediante la regulación de la actividad de los transportadores específicos K^+ y de la bomba de H^+ que genera la fuerza motriz para el transporte de iones (Zhu et al., 1993). Munns (2005) ratifica que la tolerancia a la salinidad está determinada por genes que: limitan la tasa de absorción de sales del suelo y el transporte por la planta, ajustan el balance iónico y osmótico de las células en raíces y tallos, y regulan el desarrollo de la hoja y el comienzo de la senescencia. En muchas glicófitas la tolerancia se correlaciona con la capacidad de limitar la absorción de Na^+ y Cl^- en las partes aéreas, restringiendo estos iones a la raíz y la parte inferior del tallo (Murillo-Amador et al., 2006). La mayoría de las glicófitas limitan la absorción de sodio o realizan una compartimentación del mismo en los tejidos más viejos, como las hojas, que sirven de almacén (Cheeseman, 1988).

La capacidad de las plantas de tener un sistema más eficiente para la absorción selectiva de K^+ sobre Na^+ y mantener una alta relación K^+/Na^+ o $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ en sus tejidos es otro factor determinante de la tolerancia a la salinidad (Maathuis y Amtmann, 1999, Munns y James, 2003). La relación K^+/Na^+ se reduce por el efecto competitivo del Na^+ presente en la rizosfera sobre la absorción de K^+ (Carvajal et al., 1999; Asch et al., 2000). Las plantas glicófitas sometidas a estrés salino pueden restringir la absorción de Na^+ y mantener los niveles de K^+ en los tejidos mediante la captación selectiva de K^+ y la compartimentación en las vacuolas de los iones Na^+ , evitando así su transporte hacia los brotes de crecimiento (Carden et al., 2003). Además, la mayor relación K^+/Na^+ tanto en la raíz como en la parte aérea, también mejora la resistencia de la planta a la salinidad (Asch et al., 2000). Sin embargo, Bernstein et al. (1974) obtuvieron que, a pesar de los efectos beneficiosos de la fertilización potásica, un aumento en la relación K^+/Na^+ no ayuda a reducir los efectos negativos de la salinidad en el crecimiento de plantas de maíz.

Munns (2002) recomienda adicionar de 5 a 10 mM de calcio al medio para concentraciones de 100 a 150 mM de NaCl y así contrarrestar el efecto inhibitorio de altas concentraciones de sodio sobre el crecimiento de la planta. Ashraf y Khanum (1997), concluyen que el estado iónico de la planta puede ser utilizado para identificar la tolerancia a la salinidad de la misma, existiendo una fuerte relación con la tolerancia a la salinidad y pudiendo ser considerado como una herramienta en la selección de cultivares tolerantes a la salinidad (Omielon et al., 1991).

b) Exclusión selectiva de iones y compartimentación de iones a nivel celular

La inclusión de iones en el citoplasma puede conducir a un ajuste osmótico que generalmente se acepta como una importante adaptación a la salinidad (Guerrier, 1996). Las plantas halófitas y glicófitas no pueden tolerar grandes cantidades de sales en el citoplasma, así que bajo condiciones salinas requieren de mecanismos que excluyan las sales del citoplasma, tales como: transporte hacia la hoja, excreción del exceso de sales, acumulación en órganos especializados (vacuolas o glándulas), defoliación de hojas viejas y compartimentación en las vacuolas o en diferentes tejidos, para facilitar sus funciones metabólicas (Cheeseman, 1988; Zhu, 2003).

Para Picchioni y Graham (2001), y Tester y Davenport (2003) una forma de tolerancia para contrarrestar el efecto osmótico es bombear continuamente iones sodio y cloro a los tejidos aéreos. Una vez que los iones están en la corriente transpiratoria, el último destino es el tejido de la hoja. En este punto, una de los mecanismos de defensa es la retención en las vacuolas donde la concentración de iones Na^+ puede pasar de 2 a 5 veces la concentración en el citoplasma (Zhu, 2003). Los solutos son transportados a través de las membranas de las células de las plantas mediante un gradiente de protones (Taiz y Zeiger, 2006). Este mecanismo es utilizado por las plantas para excluir el sodio del citoplasma a fin de mantener unas concentraciones optimas en la célula y para evitar el desarrollo de un gradiente mineral fuerte a través de la membrana plasmática o el tonoplasto (Zhu, 2003). Este transporte de Na^+ desde el citoplasma o la compartimentación en las vacuolas de las células vegetales a través de la membrana plasmática, depende de energía y depende del gen SOS1 (sensible a la sal) que actúa como un transportador antiporte de Na^+/H^+ (Taiz y Zeiger, 2006).

Con el fin de regular el contenido iónico de la parte aérea, las hojas maduras se cargan de iones no deseados y posteriormente se desprenden de la planta (Batanouny, 1996), considerándose la defoliación como un mecanismo extremo de exclusión de iones. Con este mecanismo se consigue disminuir la carga salina, se reduce la superficie foliar y por tanto las pérdidas de agua por transpiración, evitando el déficit hídrico asociado al estrés salino.

En ambientes salinos, aproximadamente el 90% del Na^+ y Cl^- es excluido a la superficie exterior de la raíz (Munns, 1993), y comparando la concentración de Na^+ fuera de la raíz de las plantas y en el xilema, el 97% aproximadamente puede ser excluido (Munns, 1993). Sin embargo, la recuperación de Na^+ desde la parte aérea hacia la raíz a través del floema es despreciable en la mayoría de las plantas (Tester y Davenport, 2003).

c) Síntesis de solutos compatibles y ajuste osmótico

El ajuste osmótico es otro mecanismo en la tolerancia a la salinidad así como de otros estreses abióticos (sequía y calor). Las plantas son capaces de tolerar la salinidad reduciendo el potencial osmótico celular como consecuencia de sintetizar, aumentar y acumular una serie de compuestos orgánicos, denominados solutos compatibles (Hasegawa et al., 2000; Ashraf y Harris, 2004), generalmente son de bajo peso molecular, altamente solubles en agua, no tóxicos a altas concentraciones celulares (Ashraf y Foolad, 2007), y no interfieren con las reacciones bioquímicas normales (Hasegawa et al., 2000). El agua fluye de una región con alto potencial hídrico a una debajo potencial. Con la ayuda de estos osmolitos acumulados, el potencial de agua dentro de la célula se mantiene a un nivel bajo, evitando la pérdida de agua intracelular. Entre ellos, se encuentran azúcares solubles, ácidos orgánicos y compuestos que contienen nitrógeno, tales como aminoácidos, amidas y compuestos de amonio cuaternario (CAC) (Ashraf y Harris, 2004), principalmente prolina y glicina-betaína (Khan et al., 2000; Ashraf et al., 2008).

d) Cambios en la capacidad fotosintética y alteración en la estructura de la membrana

La reducción de la tasa fotosintética de las plantas bajo salinidad es debida principalmente a la reducción del potencial hídrico. El objetivo de incrementar la tolerancia es aumentar la eficiencia del uso del agua, así existen plantas como *Mesembryanthemum crystallinum* que cambia su modo de fotosíntesis de C3 a CAM (Cushman et al., 1989), de esta manera abre sus estomas por la noche para reducir la pérdida de agua, al disminuir la transpiración y por ende el transporte de sales a las partes aéreas de la planta (Marschner, 1995). Otras plantas tolerantes a la salinidad desplazan su mecanismo fotosintético de C3 a C4 como respuesta a la salinidad (Zhu, 2001).

Altas concentraciones iónicas de Na^+ pueden alterar la estructura y función de la membrana, interfiriendo en el equilibrio y la absorción de nutrientes, y causando síntomas de deficiencia nutricional similares a los que ocurren en ausencia de salinidad (Grattan y Grieve, 1999).

e) Aplicación de solutos compatibles, antioxidantes y hormonas

Las plantas sintetizan sustancias orgánicas (como prolina, glicina betaína, etc.) para disminuir el potencial osmótico del citoplasma y la vacuola cuando las sales son excluidas a las hojas, y así conseguir que el potencial hídrico disminuya. Por tanto, la aplicación exógena de estos productos puede minimizar los efectos negativos de la salinidad (Ashraf y Foolad, 2007; Azcón-Bieto y Talón, 2008). La salinidad también produce cambios en los niveles de fitohormonas (Marschner, 1995), detectándose que altas concentraciones de sales aumentan los niveles de ácido abscísico (ABA) en las hojas (Ashraf et al., 2008) y disminuyen la citoquinina (Marschner, 1995).

La aplicación de ABA induce la síntesis de la proteína llamada osmotina, asociada a un aumento de tolerancia al NaCl (Azcón-Bieto y Talón, 2008), altos niveles de esta proteína son importantes para el ajuste osmótico a nivel celular y de toda la planta. También las poliaminas, que tienen efecto sobre la síntesis de proteínas, se acumulan en plantas sometidas a estrés salino, por lo que su aplicación puede incrementar el crecimiento de las plantas (Marschner, 1995).

Por otra parte, en condiciones de alta salinidad se producen especies reactivas de oxígeno (ROS), entre las que se incluyen súper óxido, peróxido de hidrógeno y radicales hidroxilos en el cloroplasto, mitocondrias y peroxisomas, descomponiendo moléculas de proteína, lípidos y ácidos nucleicos (Ashraf et al., 2008; Azcón-Bieto y Talón, 2008). Cuando los procesos de fotosíntesis se ven afectados por las ROS se producen antioxidantes (ascorbato, carotenoides, α -tocoferol) y enzimas desintoxicantes (catalasa, super óxido dismutasa y peroxidasa) (Apse y Blumwald, 2002; Ashraf et al., 2008) que generan un aumento en la producción, con lo cual son un indicador de tolerancia a la salinidad. Debido a que las plantas menos tolerantes no producen suficientes antioxidantes para secuestrar todas las ROS es muy importante la aplicación foliar de los mismos. En este sentido, Athar et al. (2009) mejoraron el efecto adverso de la salinidad sobre la germinación de dos cultivares de colza (cv. Cyclonethanon y cv. Durkeld) al agregar al medio de crecimiento dosis de 1 y 5 mM de glicina betaína y prolina.

En resumen, en la Figura 2.5 se presenta la respuesta de las plantas a la salinidad y sus posibles mecanismos de adaptación.

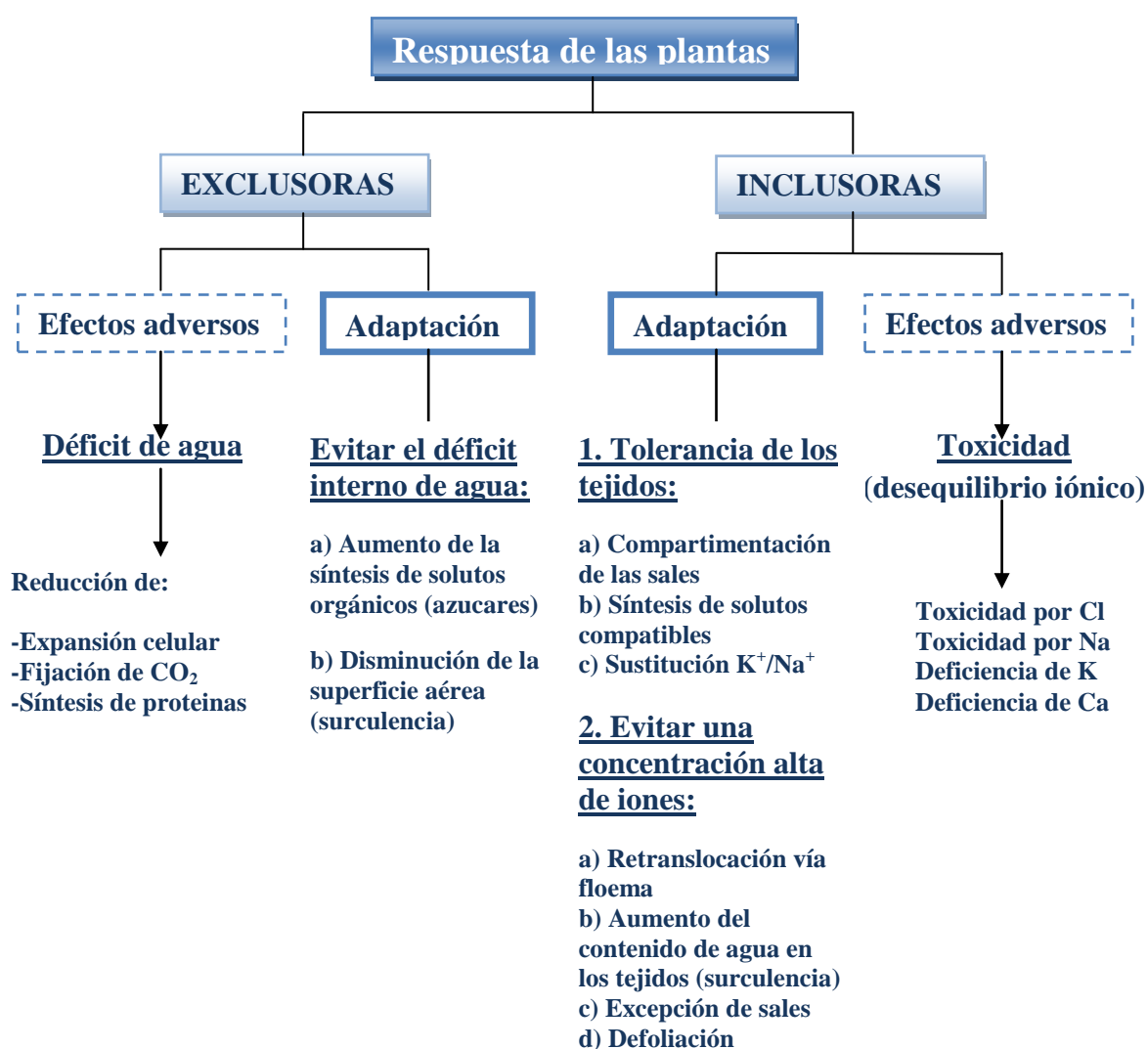


Figura 2.5. Efectos adversos de la salinidad y posibles mecanismos de adaptación (Adaptado de Greenway y Munns, 1980, con autorización de Annual Review of Plant Physiology. Copyright 1980 by Annual Review Inc.) (Marschner, 1995).

2.2.2.2. Factores que afectan la tolerancia a la salinidad

Además de los diferentes mecanismos para adaptarse o tolerar las condiciones salinas que tienen las plantas, existen una serie de factores que modifican la tolerancia a la salinidad, como son las condiciones climáticas y las prácticas culturales, que pueden influir de forma diferenciada en el efecto que la salinidad tiene en las plantas, por lo cual existen diferentes estrategias tecnológicas y biológicas (Ashraf et al., 2008) para

disminuir este efecto. Estas prácticas se pueden separar en cuatro categorías distintas: (a) Gestión del riego, (b) gestión del clima (c) prácticas culturales (incluye enriquecimiento carbónico, tipo de suelo, fertilización y acondicionamiento de semillas) y (d) genotipos tolerantes a la salinidad.

a) Gestión del riego

El manejo del riego tiene un efecto importante en la tolerancia de los cultivos. La gestión del riego en condiciones salinas tiene como objetivo conseguir que la concentración de sales en la zona de la raíz se sitúe por debajo del umbral de tolerancia del cultivo durante todo el ciclo de desarrollo para reducir los efectos perjudiciales de la salinidad (Hoffman y Shannon, 2007; Paranychianakis y Chartzoulakis, 2005). Para conseguir este objetivo se tiene que realizar una adecuada programación del riego (optimizando tanto frecuencia como dotación) y seleccionar el método de riego más adecuado, como puede ser el riego localizado.

En lo que respecta a la programación de riego, numerosos son los trabajos que estudian la influencia de la frecuencia de riego en la tolerancia de los cultivos. Rhoades (1972) indica que las plantas pueden tolerar altos niveles de salinidad si existe un alto potencial matricial, el cual se puede conseguir con riegos frecuentes. Cuando se riega con aguas salinas el potencial osmótico se hace más negativo, este efecto se puede contrarrestar con una mayor frecuencia de riego, ya que aumentamos el potencial matricial, pudiendo aumentar el potencial hídrico al que son sometidas las plantas. Además, altas frecuencias de riego hacen que se reduzcan las diferencias entre la concentración de sales en el punto de emisión y el aérea circundante, donde se desarrollan las raíces, alejando las sales del entorno radicular. Esto último también se produce en los sistemas sin suelo en sustratos donde en la mayoría de los casos la CE es más alta en el drenaje que en el medio radicular, creando una reducción del potencial osmótico e incrementando la tolerancia de las plantas a la salinidad (Sonneveld, 2004).

Savvas et al. (2007) también obtienen que cuando se utiliza agua de elevada salinidad, la frecuencia de riego influye en la producción de pimiento desarrollado en invernadero y sistema hidropónico. El estudio muestra que la alta frecuencia de riego mitiga significativamente los efectos nocivos de la salinidad (Savvas et al., 2007).

En lo que respecta a la dotación, la aplicación de riegos de lavado es el método más eficaz para reducir la concentración de sales en el suelo o sustrato (Ayers y Westcot, 1985; Oster, 1994). Ayers y Westcot (1985) indican que la eficacia de la lixiviación de las sales depende de los suelos y de la forma de aplicación del agua. También, en riego localizado es necesario incluir una fracción de lavado con abundante agua para bajar la concentración de sales (Goldberg et al., 1971).

El método de riego utilizado es determinante para reducir el efecto del contenido salino del agua de riego. En 1973, Gornat et al. observaron diferentes respuestas productivas en función de los métodos de riego, en cultivo de tomate, pimiento y pepino, en condiciones salinas. La utilización de riego por goteo se presenta como el mejor sistema cuando se utilizan aguas de salinidad elevada, disminuyendo el efecto de la salinidad sobre el rendimiento del cultivo, llegando a mejorar la producción hasta un 100 % (Goldberg y Shmueli, 1970; Goldberg et al., 1976). La utilización de riego por aspersión con agua de salinidad elevada frecuentemente ocasiona daños en las hojas de los cultivos (Sonneveld, 2004). Sin embargo, la microirrigación que evita la humectación de la hoja, si se aplica frecuentemente produce una lixiviación continua de las sales del suelo (Hoffman y Shannon, 2007). Hanson y May (2004) obtienen que para la producción de tomate de industria, el riego por goteo produce un aumento considerable en la producción de fruto con respecto al riego por aspersión, consiguiendo mantener el nivel de salinidad del suelo.

El uso de riego por goteo subterráneo parece ser un método ideal para riego con agua salina. Oron et al. (2002) obtuvieron un aumento del rendimiento al colocar el sistema de riego por goteo enterrado en comparación con el riego superficial. Además, la profundidad a la que se encuentran los emisores parece ser un parámetro crítico, ya que afecta a la distribución de salinidad en la zona de la raíz y por lo tanto la intensidad del estrés.

El empleo de riego localizado de alta frecuencia modifica la distribución y localización de iones en el perfil del suelo como resultado del movimiento del agua. La distribución de nutrientes en suelo ha sido estudiada por diferentes autores. Mmolawa y Or (2000) estudian la dinámica del agua y los solutos en la zona de la raíz bajo riego por goteo y su relación con la densidad de raíz y los patrones de absorción de agua por la

raíz. El movimiento y la absorción de P ha sido estudiada por Guertal (2006). La distribución de sales bajo diferentes regímenes de riego ha sido documentada por Wang et al. (2012). Los patrones de distribución de nutrientes en suelo para más de 10000 perfiles en condiciones ecológicas han sido estudiados por Jobbágy y Jackson (2001).

b) Gestión del clima

Los parámetros ambientales, tienen un efecto muy importante sobre la tolerancia a la salinidad, ya que modifican la tasa de transpiración del cultivo. La interacción que existe entre la salinidad y la transpiración de la planta es debida a que ambas controlan el estado hídrico de la planta, la salinidad influye en la entrada de agua a la planta a través de la raíz y la transpiración a la salida (Yaling, 2000). Las plantas que mantienen altas tasas de transpiración durante el estrés son menos tolerantes a la salinidad (Flowers, 2004). La alta temperatura y alta transpiración incrementan el efecto de la salinidad, reconociéndose que la humedad es uno de los factores más importantes. Una mayor humedad en el medio ambiente compensa la reducción del crecimiento de las plantas por salinidad, posiblemente debido a la disminución de la transpiración (Sonneveld, 2004), ya que la capacidad de ajustar las tasas de transpiración hace a la planta más tolerante. Igualmente está confirmado que en climas fríos y húmedos las plantas toleran mejor la salinidad (Niu y Cabrera, 2010).

c) Prácticas culturales

c.1.) Enriquecimiento con CO₂

El estrés osmótico por salinidad conduce al cierre de los estomas para restringir el volumen de aire intercambiado con el ambiente (Hoffman y Shannon, 2007), y por lo tanto puede provocar una disminución en la tasa de difusión y fijación fotosintética de CO₂, además de limitar la absorción pasiva de iones por las raíces (Flexas et al., 2004, 2008; Robinson et al., 2007). El suministro de CO₂ puede compensar la reducción de intercambio de aire y disminuir el efecto de la salinidad ya que incrementa la fotosíntesis, promoviendo así una mayor eficiencia en el uso del agua (Marschner, 1995; Salas y Urrestarazu, 2004) y estimulando la producción de materia seca (Marschner, 1995).

c.2.) Tipo de suelo

El grado de acumulación de sales varía dependiendo de la textura del suelo. Hamdy et al. (1993) en suelos de textura pesada (arcillosos) observan que las sales se acumulan en mayor grado que en suelos arenosos, pero sin embargo, las plántulas se desarrollan mejor que en suelos arenosos. Estos investigadores lo explican basándose en la variación de la capacidad de retención de agua en función de la textura del suelo. Los suelos de textura media y fina tienen la ventaja sobre los suelos de textura gruesa de poseer una mayor capacidad de retención de agua y sales, pero la prevención de la acumulación de sales se ve dificultada por la baja permeabilidad que tienen. Tscheschke et al. (1974) indican que en suelos limo-arenosos los cambios en el contenido de agua del suelo dan lugar a pequeñas variaciones en el potencial matricial pero producen grandes incrementos de la concentración de sales en la disolución del suelo, variando el potencial osmótico, extrayendo la planta la mayor parte del agua de las inmediaciones del emisor, donde hay un potencial hídrico relativamente alto.

Hummedi y Ghliem (1984) obtienen mayores rendimientos de tomate en suelo de textura arcillo-limosa que en suelo arenoso a CE de $4,5 \text{ dSm}^{-1}$. Esto lo atribuyen a una mayor capacidad de retención de agua del suelo arcilloso el cual tiende a diluir los efectos de las sales del medio de crecimiento junto a su mayor nivel de fertilidad.

La técnica del “enarenado”, que consiste en aplicar sobre el suelo original o sobre una capa de tierra aportada de 20-30 cm de espesor una capa de materia orgánica (de 1-2 cm de espesor) y sobre esta una capa de arena (de 5-10 cm de espesor), disminuye los efectos agronómicos de la salinidad en los cultivos (Maroto, 1990), aumentando la tolerancia, y así está documentado en diversos trabajos (Parra y Cruz-Romero, 1977; Martínez, 1988; Segura, 1995). Este aumento de tolerancia podría asociarse al hecho de que la planta se desarrolla en un perfil que se mantiene más húmedo y homogéneo en el tiempo y con un mayor potencial hídrico, con lo cual se reducen los efectos del estrés salinos.

De la Torre (1984) determina que en un suelo enarenado la mayor acumulación de sales se encuentra en la zona entre goteros, disminuyendo en el entorno radicular gracias a la absorción de la planta y a los lavados por el riego. En la zona inmediatamente inferior al gotero, en la arena, la conductividad eléctrica es mayor que en las zonas más profundas, en

la zona entre goteros se acumulan más sales cerca de la capa orgánica, esta acumulación es mayor entre la capa de arena y de materia orgánica. Sin embargo, Lorenzo y Segura (1984) en determinaciones realizadas a partir de muestreos experimentales obtienen resultados que difieren del autor anterior respecto a la acumulación de sales debajo del gotero, siendo menor en la capa de arena que en la parte orgánica- mineral (en un perfil de 10 cm), invirtiéndose este efecto a 10 cm del gotero, al aumentar la concentración de sales en la capa de arena y disminuir en la zona compuesta por la materia orgánica y el suelo, en el mismo perfil de 10 cm.

Llanderal et al. (2012) estudiaron, en suelos enarenados en condiciones de invernadero del Almería, la distribución de sales en el perfil del suelo, al inicio y final de un ciclo de judía verde en dos tipos de suelo con diferente contenido en materia orgánica (0,58 % y 1,65 %), obteniendo que la CE en la capa de arena es significativamente mayor a la obtenida en las capas de suelo, coincidiendo con lo observado por De la Torre (1984), debido probablemente a que la evaporación en este perfil de arena produce una acumulación de sales en esta capa, sin embargo no se produce en las capas inferiores ya que los cambios bruscos en el tamaño de los poros del suelo (capa de arena sobre capa de suelo de textura franca) rompen el movimiento de ascenso de agua por capilaridad (Bachmann et al., 2001).

La capa de arena tiene un efecto positivo al disminuir la acumulación de sales en el suelo (Malcolm, 1983). Se produce de forma muy acentuada cuando la textura de la capa mineral del enarenado es arcillosa, pero cuando es arenosa no se aprecia en las zonas próximas al gotero, únicamente en aquellas más alejadas (García y Segura, 1984).

En el horizonte formado por la materia orgánica se produce mayor acumulación de sodio y cloruros en el enarenado con tierra de textura arcillosa que en el caso de tierra arenosa, bajo la técnica de fertirrigación (De la Torre, 1984).

Cadahía et al. (1988) estudiaron el efecto de la solución nutritiva aplicada en fertirrigación y condiciones salinas, en los tres horizontes enarenados, indicando que estos tienen comportamientos semejantes en lo que respecta a la conductividad eléctrica y concentración de sales de calcio, sodio y cloruros.

c.3.) Fertilización

La tolerancia a la salinidad por la planta se ve reducida en condiciones de baja disponibilidad de nutrientes (Hamdy, 2005). El concepto de la reducción de los efectos de la salinidad a través de la fertilización intensiva, ha sido evaluado por diversos autores (Ravikovitch y Porath, 1967; Kafkafi, 1984; Feigin, 1985; Adams y Doerge, 1987; Guzmán, 2011) y todos concluyen que una adecuada fertilización puede reducir los efectos de la salinidad.

La disolución nutritiva a aplicar a un cultivo regado con agua salina pasa por una modificación o adaptación de esta, en función de los contenidos de sales que contiene, tales como Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} (Schwarz, 1979; Cadahía et al., 1984; Guzmán, 2011). Teniendo en cuenta también, que la salinidad en el suelo de cultivo puede incidir en un aumento de elementos de cambio como Na, K y Mg (Nukaya et al., 1980).

El estrés salino también puede verse reducido parcialmente por el aporte de Ca^{2+} (Läuchli y Epstein, 1990; Cramer, 2002). El Ca^{2+} reduce el efecto adverso del sodio mediante el control de la absorción a través de la selectividad de la membrana celular (Munns, 2002). Cuando existe suficiente Ca^{2+} en el medio radical existe una absorción preferencial del ión Ca^{2+} sobre la membrana, modificando sus propiedades y disminuyendo la permeabilidad de los cationes monovalentes y otros iones, lo que podría mantener el balance iónico normal en concentraciones altas de electrolitos (Munns y Termaat, 1986), por lo que la relación $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ es un indicador de la tolerancia a la salinidad (Foolad, 1997).

El efecto de la fertilización sobre los cultivos en condiciones salinas, así como las interacciones NO_3/Cl , Na/K y Na/Ca se desarrollan en el apartado 2.2.3.

c.4.) Acondicionamiento de semillas

La impregnación de semillas es una práctica que puede mejorar la respuesta de las plantas a la salinidad, acelerado la germinación, emergencia, y el crecimiento de las plántulas (Cuartero y Fernández, 1999; Guzmán y Olave, 2006). Las principales técnicas de acondicionamiento son de tipo osmótico (Buitink et al., 2000) y matricial (Meredy et al., 2000) y se utilizan para aumentar la tasa de germinación y la uniformidad de las plántulas. Fundamentalmente, las sustancias que se utilizan para la

imprimación son cloruro sódico (Cayuela et al., 1996; Svritepe et al., 1999; Aikinci et al., 1999; Svritepe et al., 2003; Olave y Guzmán, 2004; Guzmán y Olave, 2006), polietilenglicol (Buitink et al., 2000), o fertilizantes, especialmente potasio nitrato (Kang et al., 1996; Bradford et al., 1988; Olave y Guzmán, 2004; Guzmán y Olave, 2006) a diferentes concentraciones, durante distintos períodos de tiempo y con o sin oxigenación y oscuridad. Con respecto a la impregnación con NaCl, İşeri et al. (2014) encontraron que la impregnación de las semillas de tomate en una disolución de NaCl produce una mejor respuesta adaptativa de las plántulas contra los efectos nocivos de la sal, ya que causa un aumento de la longitud de las raíces y del hipocotílo, así como aumentos en el peso fresco que mejoran el vigor de las plántulas. Además de mayor acumulación de moléculas osmoreguladoras de defensa, tales como prolina y antocianina.

d) Genotipos tolerantes a la salinidad

d.1.) Mejoramiento genético

El mejoramiento genético en los genotipos de interés agrícola y/o ornamental se ha propuesto como estrategia (Ashraf et al., 2008), por lo que se intenta conseguir plantas transgénicas para incrementar la resistencia a la salinidad. Entre los genes que se han estudiado se encuentran: el TRK1, que codifican un transportador altamente selectivo de K^+ frente a Na^+ , los genes ENA que codifican una bomba de extrusión de Na^+ , seis genes NHX, dentro de los cuales las isoformas NHX1 y NHX2, localizadas en el tonoplasto, su actividad permite la acumulación de K^+ y Na^+ en la vacuola debido al intercambio con el H^+ contribuyendo al control del pH vacuolar y a la acumulación de osmolitos. Igualmente, la proteína SOS1 antiportador de $Na^+ : K^+$ de la membrana plasmática regulada por el complejo SOS2/SOS3, esencial para la tolerancia al NaCl (Azcón-Bieto y Talón, 2008). También se ha utilizado el enfoque transgénico para producir glicinabetaína y prolina en exceso parece ser eficaz para aumentar la tolerancia (Ashraf y Foolad, 2007).

d.2.) Búsqueda y selección de especies tolerantes

Otra estrategia es el uso de la variación genética en ambientes estresantes (Flowers y Colmer, 2008). Munns et al. (2002) sugiere que el cribado para un rasgo

específico de tolerancia a la salinidad es un buen método, sin embargo, los conocimientos fisiológicos de mecanismos de tolerancia deben ser utilizados para identificar estos rasgos y que puedan ser empleados para una rápida, fiable y rentable técnica de selección (Ashraf et al., 2008).

2.2.3. Absorción de nutrientes en condiciones salinas

Como se ha comentado anteriormente, la presencia de concentraciones altas de Na^+ y Cl^- en la solución del suelo o sustrato puede afectar la absorción de los nutrientes, a continuación se detallan los efectos producidos para cada nutriente.

2.2.3.1. Nitrógeno

La absorción de N por la planta disminuye con el aumento de la salinidad, pero su concentración tisular final (mg de N kg^{-1} de materia seca) incrementa o se mantiene constante si se realiza un aporte suficiente de nitrógeno (Munns y Termaat, 1986). Esto sugiere que la tasa de crecimiento de las plantas es más lenta bajo salinidad y podría impedir el efecto de dilución de los elementos, por tanto la concentración de N no puede estar asociada con el daño por la salinidad en el crecimiento vegetal. Por otra parte, altas concentraciones de Cl^- disminuyen la absorción de nitrato ya que actúa como ión antagonista e indirectamente puede inhibir la actividad de la nitrato reductasa que se correlaciona positivamente con la entrada de nitrato (Barber, 1995; Fan et al., 2002; Debouba et al., 2007; Lee, 2009).

La salinidad reduce la concentración de NO_3^- en las hojas, sin afectar el N total en la planta (Hu y Schmidhalter, 1997), debido a la interacción entre el cloruro sódico y los transportadores de nitrato en la membrana de la raíz y/o en los procesos de translocación de compuestos nitrogenados movilizándolo el nitrato a los ápices de crecimiento (Mane et al., 2011a). Sin embargo, Mengel y Kirkby (1987) mencionan que la interacción aniónica entre NO_3^- y Cl^- ha sido interpretada como un efecto de reemplazo no específico y no como una competencia por el transportador. La inhibición de la absorción de NO_3^- por Cl^- depende de la especie y de la concentración tanto de NO_3^- como de Cl^- en el medio de absorción (Cerezo et al., 1997).

La revisión realizada por Grattan y Grieve (1999), revela que la inhibición de nitrato por Cl^- es más acusada a baja salinidad cuando se utiliza CaCl que al utilizar KCl . Por otra parte, la adición de concentraciones crecientes de NO_3^- produce un descenso lineal en la absorción y acumulación de Cl^- , debido al antagonismo entre estos dos iones (Kafkafi et al., 1982; Mengel y Kirkby, 1987; Hu y Schmidhalter, 1997).

Además, la forma de suministrar el nitrógeno a las plantas en condiciones salinas podría no sólo influir en la concentración de Cl^- , sino también en la de otros cationes como Ca^{2+} y K^+ . Por ejemplo, Martínez y Cerda (1989) encontraron que al incrementar la relación $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ aplicada, en plantas de pepino se produjo una acumulación mayor de Na^+ y Cl^- y menor Ca^{2+} y K^+ en hoja. La forma de aplicación de N también podría influir en la sensibilidad de la planta a la salinidad, en trigo y maíz fueron más sensibles a la salinidad cuando la relación $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ aumentó (Botella et al., 1997), y en semillas de melón impregnadas en 150 mM de diferentes soluciones NH_4NO_3 , $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, KNO_3 y NaCl , germinadas a tres niveles de salinidad (0,5, 2,5 y 5,0 dS m^{-1}) y regadas en semillero con cinco tratamientos, tres formas de N (NH_4NO_3 , $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, KNO_3), NaCl y agua (control), se obtuvo el mayor crecimiento y producción de biomasa aplicando NH_4NO_3 y KNO_3 durante el período de semillero (Guzmán y Olave, 2006).

La competencia entre Cl^- y NO_3^- y el efecto interactivo entre Na^+ y NH_4^+ bajo condiciones salinas significa que la forma de N juega un papel crítico en condiciones salinas, así la relación $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ debe tenerse en cuenta y ser baja en medios salinos, con lo cual al utilizar aguas de baja calidad con alto contenido de Cl^- es recomendable las aplicaciones crecientes de nitratos.

Interacción Cl/NO_3

Numerosos son los trabajos que ponen de manifiesto el efecto antagónico nitratos-cloruros que tiene lugar en la planta que se desarrolla en condiciones salinas (Palomino, 1980; Aslam et al., 1984; Papadopoulos et al., 1985; Cerda y Martínez, 1988), presentando diferente sensibilidad a esta interacción (Cl/NO_3), según el cultivo. Así por ejemplo, el pimiento muestra unos niveles de nitratos en savia más bajos que el de tomate, frente a concentraciones semejantes de cloruros (Alcaraz et al., 1982). Altas concentraciones de Cl^- pueden producir un descenso del contenido de NO_3^- en la planta con el peligro de inducir

deficiencias de nitrógeno (Torres y Bingham, 1973; Kafkafi et al. 1982; Cadahía et al., 1988; Masaguer et al., 1990). Efectos de reducción sobre la absorción de nitratos se manifiestan a concentraciones de cloruros mayores de 15 mM o 4200 mg L⁻¹ Cl⁻ en savia (Cadahía, 1968). Pérez-Alfocea et al. (1993) en cultivo de tomate sometido a varios niveles de NaCl en arena silíceas, observan que el efecto de la salinidad en la concentración de N total y de NO₃⁻ depende parcialmente del nivel de NaCl y de la duración del estrés, pero también en parte de los diferentes grados de tolerancia a la salinidad de la especie. Estos autores detectan una relación inversa entre la concentración de NO₃⁻ y Cl⁻ acumulados en los tallos de la planta.

Así mismo, la adición de concentraciones crecientes de NO₃⁻ produce un descenso lineal en la absorción y acumulación de Cl⁻, debido al antagonismo entre estos dos iones (Kafkafi et al., 1982; Mengel y Kirkby, 1987; Hu y Schmidhalter, 1997). Altas concentraciones de NO₃⁻ en la solución nutritiva pueden mejorar los niveles umbrales de tolerancia del cultivo a la salinidad (Beltrao y Asher, 1993). Un aumento de la concentración de NO₃⁻ en la solución nutritiva en torno a 18 mM reduce los efectos tóxicos de cloruros en planta de tomate en cultivo hidropónico (Luque et al., 1980). Según Hernando y Cadahía (1973) concentraciones altas de cloruros presentes en la solución, requieren el aumento de la concentración de nitratos en el rango de 10-15 mM para competir con los cloruros. Kafkafi et al. (1984) determinan que una concentración óptima de NO₃⁻ en la disolución oscilaría entre 7 y 13 mM de NO₃⁻ para obtener un adecuado crecimiento de tomate en recirculación.

Papadopoulos y Rending (1983) observan en cultivo de tomate en suelo, que a conductividades eléctricas de 1,0 dS m⁻¹, al aumentar la concentración de nitratos se produce una respuesta positiva del cultivo, pero no hay tal respuesta a conductividades eléctricas de 5-9 dS m⁻¹.

2.2.3.2. Fósforo

La salinidad parece no tener un efecto tan claro sobre la absorción de este elemento (Pardossi et al., 1999). Al respecto, Grattan y Grieve (1999), mencionan que la mayoría de los estudios donde la concentración de P en los tejidos aumenta en presencia de salinidad fueron realizados en arena, hidroponía o sin suelo, en los cuales la concentración de P en la solución son más altos que en la solución del suelo y está

suficientemente disponible. Sin embargo, en la mayoría de los casos, la salinidad disminuye la absorción y la concentración de P en el tejido de la planta (entre 30 y 50%) principalmente debido a la reducción de la disponibilidad de fosfato en el suelo y en la solución del medio radical a consecuencia del desequilibrio de iones que puede causar interacciones entre ellos (Grattan y Grieve, 1999). También puede deberse a la baja solubilidad de minerales P y Ca (Sharpley et al., 1992; Marschner, 1995).

2.2.3.3. Potasio

El estrés salino inhibe la absorción y transporte de K^+ (Lynch y Läuchli, 1985) y causa un flujo de salida de K^+ , produciéndose un daño a las membranas celulares y salida de solutos (Munns, 2002).

En grandes cantidades, el Na^+ puede reemplazar algunas funciones osmóticas del potasio, pero puede perturbar la integridad de la membrana de la raíz y alterar su selectividad (Marschner, 1995; Grattan y Grieve, 1999). El potencial osmótico de las hojas en pleno turgor no es afectado por el reemplazo de K^+ con Na^+ aunque el grado en que el K^+ puede sustituir al Na^+ en los procesos metabólicos puede variar según la familia y especie de planta (Subbarao et al., 1990).

También puede existir un antagonismo entre K^+ y Mg^{2+} (Marschner, 1995), se ha sugerido que la translocación de Mg^{2+} está negativamente correlacionada con altas concentraciones de K^+ en la raíz (Huang y Grunes, 1992).

Mantener niveles adecuados de K^+ entre 1 a 6% de la materia seca de la planta (Sánchez, 2004), o en un rango entre 130 a 150 mM de K^+ en el citosol y a nivel de las vacuolas entre 20 a 100 mM aproximadamente (Mengel, 2007), es esencial para la supervivencia de las plantas a la salinidad, ya que contribuye al ajuste osmótico, que es un pre-requisito para mantener la presión de turgor y el balance de agua de las plantas (Marschner, 1995).

Interacción K/Na

Por otra parte, incrementos en la concentración de Na^+ compite con el K^+ , por la absorción en las células y la relación K/Na y el coeficiente de selectividad K/Na disminuyen con el aumento de la salinidad (Salim, 1989; Cachorro et al., 1994). Para

aumentar estas relaciones se ha propuesto un aporte suplementario de calcio, ya que aumenta la absorción de K^+ en detrimento de Na^+ al reactivar las acuaporinas, estas proteínas forman canales en las membranas que permiten el paso libre de agua como respuestas a los cambios de presión osmótica e hidrostática (Marschner, 1995; Fernández et al., 2008).

Los efectos tóxicos asociados a sodio se pueden producir a partir de 1300 mg L^{-1} de Na en savia, apreciándose un efecto de compensación catiónica K/Na por debajo de este valor, en cultivo de tomate en hidropónico (Cadahía, 1968). La fertilización potásica permite al cultivo en condiciones salinas contrarrestar la absorción excesiva de sodio por la planta (Fichera y Di Giorgi, 1964), mejorando su crecimiento y aumentando su relación K/Na (Helal, 1983) y mejorar la incorporación de N a las proteínas foliares de la planta, inhibido por los efectos de la salinidad del medio (Garg et al., 1982).

2.2.3.4. Otros macronutrientes

a) Calcio

El calcio juega un papel vital en la regulación de muchos procesos fisiológicos que influyen en el crecimiento y las respuestas al estrés medioambiental. El calcio preserva la integridad estructural y funcional de las membranas vegetales, estabiliza la estructura de la pared celular, regula la selectividad y transporte de iones y controla el comportamiento del intercambio iónico y las actividades enzimáticas de la pared celular, además está involucrado en la división y elongación celular (Läuchli y Epstein, 1990; Marschner, 1995; Cramer, 2002). A pesar de su importancia, la baja movilidad del Ca^{2+} hace que sus tasas de absorción y distribución en la planta, sean limitantes para muchos procesos en la planta (Cramer, 2002).

Interacción Na/Ca

La importancia del calcio y su rol protector en ambientes salinos ha sido documentada por muchos autores. Cramer (2002) demuestra que el Na^+ desplaza fácilmente al Ca^{2+} de sus lugares de unión extracelulares, por tanto, la disponibilidad de Ca^{2+} puede verse seriamente reducida en condiciones de salinidad con una baja relación Ca^{2+}/Na^+ .

La deficiencia de calcio, en general, puede alterar la selectividad y la integridad de la membrana celular y permitir la acumulación pasiva de sodio en los tejidos de la planta, ya que el sodio a través de canales de iones no específicos causa despolarización de la membrana que activa los canales de calcio y perjudica la permeabilidad selectiva de la raíz al sodio (Mane et al., 2011a). Además, la baja relación $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^{+}$ en el medio nutritivo con condiciones salinas desempeña un papel importante en la inhibición del crecimiento de las plantas, y provoca cambios significativos en la morfología y su anatomía (Cramer, 1992). Unno et al. (2002) encontraron que la distribución de Ca^{2+} en los brotes disminuyó enormemente en plantas sensibles a la salinidad, sugiriendo que la capacidad de las plantas para retener Ca^{2+} se asocia con resistencia a la salinidad. Según Rengel (1992), cualquier cambio en la homeostasis o equilibrio en la célula del Ca^{2+} es explicado como una respuesta primaria al estrés por salinidad percibida por las células de la raíz. Se ha demostrado que un incremento de la salinidad reduce la absorción de otros nutrientes, como el Ca^{2+} debido a que el exceso de sales provoca una alta presión osmótica y ocasiona la disminución en la absorción de agua, afectando a la absorción de los iones que son transportados por flujo de masas (Casas, 1999; Pardossi et al., 1999). La disminución en la absorción del Ca^{2+} en condiciones de salinidad se puede deber a su precipitación y al aumento de la fuerza iónica que reduce su actividad (Cramer, 2002).

La deficiencia de calcio también puede deberse al efecto del Na^{+} sobre el transporte de Ca^{2+} por el xilema y la redistribución del mismo dentro de la planta (Adams y Ho, 1992; Lazof y Bernstein, 1999). En este sentido, Lynch y Läuchli (1985), publicaron que el Na^{+} restringe el movimiento radial del Ca^{2+} de la epidermis de la raíz a los vasos xilemáticos de la raíz, mientras que otros autores documentan que puede inhibir el transporte de Ca^{2+} a la parte aérea, especialmente a las zonas meristemáticas y al desarrollo de las hojas (Maas y Grieve, 1987; Grieve y Maas, 1988; Lynch et al., 1988). La deficiencia y reducción en la absorción de Ca^{2+} inducida por salinidad también ha sido observada por Kopittke y Menzies (2004).

El efecto del pH sobre la deficiencia de Ca^{2+} inducida por Na^{+} también ha sido investigado, ya que el pH alcalino es característico de suelos afectados por salinidad. El pH alto puede disminuir la actividad del Ca^{2+} y por lo tanto agravar la situación (Kopittke y Menzies, 2004), a alta salinidad y alto pH la actividad de Ca^{2+} puede

disminuir en mayor medida por la formación de carbonatos de calcio (Valdez-Aguilar et al., 2009).

El aporte suplementario de Ca^{2+} mejora la absorción de K^+ , en detrimento del Na^+ (Azcón-Bieto y Talón, 2008; Ashraf et al., 2008). Cuando existe suficiente Ca^{2+} en el medio radical existe una absorción preferencial del ión Ca^{2+} sobre la membrana modificando sus propiedades y disminuyendo la permeabilidad de los cationes monovalentes y otros iones lo que podría mantener el balance iónico normal en concentraciones altas de electrolitos (Munns y Termaat, 1986).

El Na^+ en el medio de cultivo produce el aumento de sodio en la materia seca del fruto y afecta el transporte del Ca^{2+} desde la raíz a la parte aérea de la planta, produciendo problemas de blossom end rot (BER) en fruto (Greenway y Munns, 1980; Lauchli y Epstein, 1984; Lynch y Lauchli, 1985; Adams y El-Gizawy, 1986; Sonneveld y Van der Burg, 1991; Adams y Ho, 1992).

b) Magnesio.

Es parte de la molécula de clorofila, como activador enzimático, el magnesio es cofactor de casi todos los enzimas que actúan sobre sustratos fosforilados, por lo que es de una gran importancia en el metabolismo energético. Muchas enzimas requieren la presencia de iones magnesio para su acción catalítica, especialmente enzimas que utilizan ATP o aquellas que utilizan otros nucleótidos para sintetizar ADN o ARN. Está ampliamente documentado que la deficiencia de magnesio causa amarillamiento internervial especialmente en hojas viejas. El magnesio presenta fenómenos de antagonismo con otros iones, fundamentalmente con el calcio y el potasio (Marschner, 1995), los rangos de absorción con otros cationes del más alto al más bajo son: K^+ , NH_4^+ , Ca^{2+} y Na^+ (Merhaut, 2007). Tal antagonismo es tan fuerte que la presencia de uno de ellos en el medio puede provocar deficiencia del otro elemento al impedir su absorción, por la disminución en la capacidad de absorción de la membrana o por una disminución en la eficiencia de la bomba de H^+ a alta concentración de H^+ en el medio externo (Marschner, 1995).

El calcio es muy competitivo con Mg^{2+} y la raíz parece tener menos afinidad por el Mg^{2+} altamente hidratado que por el Ca^{2+} (Marschner, 1995). Por lo que altas

concentraciones de Ca^{2+} en el medio provocan un aumento de la concentración de Ca^{2+} y una disminución del Mg^{2+} en la hoja (Bernstein y Hayward, 1958).

Los altos niveles de Na^+ o Cl^- en suelo o solución nutritiva con relación a la fuente de magnesio, pueden inhibir la acumulación de Mg^{2+} en las plantas. Sin embargo, en una revisión realizada por Merhaut (2007) se muestran resultados variables, la concentración de Mg^{2+} se redujo en hojas de trébol blanco, taro y trigo, aumento en raigrás, judías y fresa y no se vio afectada en arroz.

c) **Azufre.**

El azufre es parte de las proteínas y por tanto de los aminoácidos, cistina y metionina, estos aminoácidos son precursores de otros compuestos que tienen azufre tales como coenzimas y productos vegetales secundarios. La concentración óptima de azufre varía entre 0,1 y 0,5% sobre materia seca de la planta. La fuente más importante de azufre absorbido por las raíces es el sulfato (Marschner, 1995).

Existen muy pocos estudios sobre la influencia de la salinidad en la absorción y acumulación de S, la mayoría están enfocados hacia como responde la planta a la salinidad de cloruro en comparación al sulfato, así Mor y Manchanda (1992) y, Grattan y Grieve (1999) indican que la salinidad con Cl^- reduce la concentración de S en la parte aérea del guisante, sin embargo, lo aumenta en la raíz de la planta.

2.3. **AGUA REGENERADA**

La reutilización de aguas, o el uso de agua regenerada, consiste en dar un segundo uso a este recurso tan escaso, sobre todo en ciertos momentos de estiaje y en ciertas áreas de nuestra geografía. La producción hortícola intensiva de la cuenca mediterránea de Andalucía está fuertemente ligada a una elevada demanda de agua. Por este motivo, la utilización de las aguas regeneradas en los regadíos intensivos del litoral (Cuenca Mediterránea Andaluza) constituye un recurso estratégico que puede paliar el déficit hídrico estructural que padece esta área (AAA, 2009a).

En los últimos años se ha producido un incremento en la utilización del agua procedente de depuradora para diferentes fines (Levine y Asano, 2004; Durham et al,

2005; Hochstrat et al., 2005). La aplicación de este agua puede ser diversa abarcando desde los usos menos restrictivos (riego de bosques) hasta los más exigentes (riego de productos agrícolas para su consumo en fresco), siempre y cuando se consigan unos criterios de calidad del agua mínimos para que su utilización sea segura.

En los regadíos de Andalucía se reutilizan 21 Hm³ de agua residual depurada, de esta cantidad, el 50% se emplea en el riego de 2500 ha de cultivos bajo invernadero en la subcomarca del Bajo Andarax en Almería (AAA, 2009b). Una de las razones que propicia la reutilización en este sistema de producción, es la calidad del agua regenerada de esta comarca, que presenta una menor concentración de sales respecto a las aguas de riego convencionales (acuífero) y una interesante carga fertilizante, especialmente N, P y K, elementos esenciales para la nutrición de la planta (Segura et al., 2001, 2004) que puede aumentar los rendimientos del cultivo (Shahalam et al., 1998; Ramirez-Fuentes et al., 2002; Ladwani et al., 2012) y permitir la reducción de aportes con fertilizantes adicionales (Contreras, 2001; Segura et al., 2012; Contreras et al., 2013a) con el consiguiente ahorro económico.

2.3.1. Legislación Nacional

En España, la legislación específica que regula la utilización de aguas regeneradas se recoge en el Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas. Este Real Decreto desarrolla la legislación pendiente tras la publicación del Plan Hidrológico Nacional (Ley 11/2005, de 22 de junio, por la que se modifica la Ley 10/2001, de 5 de julio) a la vez que da cumplimiento a las exigencias del Reglamento de Dominio Público Hidráulico y transpone la Directiva Marco del Agua (Directiva 2000/60/CE) y establece una serie de definiciones que se detallan a continuación, y que facilitan la comprensión del texto destacando la definición del concepto de reutilización y la introducción del concepto de agua regenerada.

Definiciones recogidas en el RD 1620/2007, de 7 de diciembre:

- *Reutilización de las aguas*: aplicación antes de su devolución al dominio público hidráulico y al marítimo terrestre para un nuevo uso privativo de las aguas que, habiendo sido utilizadas por quien las derivó, se han sometido al proceso o

procesos de depuración establecidos en la correspondiente autorización de vertido y a los necesarios para alcanzar la calidad requerida en función de los usos a que se van a destinar.

- *Aguas depuradas*: aguas residuales que han sido sometidas a un proceso de tratamiento que permita adecuar su calidad a la normativa de vertidos aplicables.
- *Aguas regeneradas*: aguas residuales depuradas que han sido sometidas a un proceso de tratamiento adicional o complementario que permite adecuar su calidad al uso al que se destinan.
- *Estación regeneradora de aguas*: conjunto de instalaciones donde las aguas residuales depuradas se someten a procesos de tratamiento adicional que puedan ser necesarios para adecuar su calidad al uso previsto.
- *Sistema de reutilización de las aguas*: conjunto de instalaciones que incluye la estación regeneradora de aguas, en su caso, y las infraestructuras de almacenamiento y distribución de las aguas regeneradas hasta el punto de entrega a los usuarios, con la dotación y calidad definidas según los usos previstos.

El Real Decreto establece las condiciones de calidad que debe cumplir el agua regenerada para su uso, indicando los usos permitidos y prohibidos y el régimen de responsabilidades en relación al mantenimiento de la calidad. En el Anexo I del RD se recogen los criterios de calidad y se fijan los valores máximos admisibles distinguiendo entre los siguientes usos: urbano, agrícola, industrial, recreativo y ambiental, aportando límites de obligado cumplimiento. Los criterios definidos tienen la consideración de mínimos obligatorios exigibles, incluyendo parámetros físico-químicos y sanitarios. Estos criterios se deben cumplir, en el punto de entrega. Además, para el resto de los parámetros es necesario que las aguas depuradas cumplan con las condiciones necesarias para el vertido de aguas residuales según se recoge en el Real Decreto 1315/1992 de 30 de octubre.

Los criterios de calidad mínima contemplados en el Real Decreto 1620/2007 hacen referencia de manera especial a parámetros sanitarios de las aguas, y de forma secundaria, con carácter general, a ciertos parámetros físico-químicos y agronómicos.

Además, en el Real Decreto se establecen una serie de controles que deberá superar satisfactoriamente para no ser una fuente de riesgos sanitarios.

La Tabla 2.6 resume las calidades de agua de uso agrícola indicadas en el citado Real Decreto, comparándolas con los datos recogidos por Levine y Asano (2004) basados en las normas de la EPA (Environmental Protection Agency, US). La tabla no incluye otros criterios que se especifican en la norma española, que en función de los usos contempla el control de otros contaminantes, como *Legionella sp.* si existe riesgo de aerolización o nitratos si se va a proceder a recarga de acuíferos.

A diferencia de las normas EPA, en el RD se especifica que los gestores han de disponer de planes de autocontrol para asegurar la calidad del agua regenerada pero no especifica el tratamiento de regeneración a aplicar.

Tabla 2.6. Criterios de calidad del agua regenerada para riego según el Real Decreto 1620/2007 y valores recogidos por Levine y Asano (2004) según la adaptación de la Environmental Protection Agency de US.

Real Decreto 1620/2007 -España		Levine y Asano (2004)- Adaptada de la EPA (US)	
Uso Agrícola	Criterios de Calidad	Uso Agrícola	Criterios de Calidad Tratamientos
Calidad 1: Sistema de aplicación del agua que permite el contacto directo del agua con las partes comestibles para alimentación humana en fresco	Nematodos Intestinales ≤ 1 huevo / 10 L <i>Escherichia coli</i> ≤ 100 UFC / 100 ml Sólidos en suspensión ≤ 20 mg/L Turbidez ≤ 10 UNT	Cultivos comestibles: Cultivos para consumo humano sin cocinar	DBO ≤ 10 mg / L Turbidez ≤ 2 NTU CF \leq ND/100 mg/L Cl ₂ residual ≤ 1 mg / L pH 6-9
	Calidad 2: a) Sistema de aplicación de agua que no evita el contacto directo del agua regenerada con las partes comestibles, pero el consumo humano no es en fresco sino con un tratamiento industrial posterior; b) Riego de pastos para consumo de animales productores de leche o carne; c) Acuicultura	Cultivos no comestibles o que necesitan procesado: Forrajes, fibras, cultivos de semillas, pastos, viveros comerciales, campos de césped y acuicultura	DBO ≤ 30 mg / L Turbidez ≤ 30 NTU CF $\leq 200/100$ mg/L Cl ₂ residual ≤ 1 mg / L pH 6-9
Calidad 3: a) Riego localizado de cultivos leñosos, sin contacto del agua regenerada con los frutos consumidos en la alimentación humana; b) Riego de cultivos de flores ornamentales, viveros, invernaderos sin contacto directo del agua regenerada con las producciones; c) Riego de cultivos industriales no alimentarios, viveros, forrajes ensilados, cereales y semillas oleaginosas	Nematodos Intestinales ≤ 1 huevo / 10 L <i>Escherichia coli</i> ≤ 10000 UFC / 100 ml Sólidos en suspensión ≤ 35 mg/L		

Conductividad Eléctrica: 3,0 dS/m; Relación de Absorción de Sodio (RAS): 6 meq/l; Boro: 0,5 mg/L; Arsénico: 0,1 mg/L; Berilio: 0,1 mg/L; Cadmio: 0,01 mg/L; Cobalto: 0,05 mg/L; Cromo: 0,1 mg/L; Cobre: 0,2 mg/L; Manganeso: 0,2 mg/L; Molibdeno: 0,01 mg/L; Níquel: 0,2 mg/L; Selenio: 0,02 mg/L; Vanadio: 0,1 mg/L.

2.3.2. Calidad agronómica de las aguas regeneradas

Los parámetros de calidad agronómica que se exigen a un agua regenerada son los mismos que los de cualquier tipo de agua (Crook, 1991). La calidad del agua regenerada va a depender del origen del agua, del tratamiento de regeneración aplicado, y del diseño y manejo del sistema de distribución (Ayers y Wescot, 1985; Crook, 1991). Los componentes que pueden degradar la calidad del agua para el riego son sales, nutrientes y contaminantes que pueden ser de origen químico, orgánico o mineral y microbiológicos.

Esta revisión se va a centrar en los parámetros físico-químicos (pH, CE, sólidos totales en suspensión, turbidez, DBO, DQO₅ y sales mayoritarias) que están estrechamente relacionados con la calidad agronómica del agua regenerada.

2.3.2.1. Criterios de calidad del agua

Según Prats y Melgarejo (2006), los principales criterios a considerar en el agua de riego son: salinidad, permeabilidad, toxicidad de iones específicos y efectos diversos tales como los excesos de nutrientes que reducen los rendimientos y la calidad de las cosechas, etc. Estos criterios coinciden con los propuestos por Ayers y Westcot (1985). Los valores de los indicadores de calidad de un agua de riego desarrollados por el Committee of Consultants de la Universidad de California y posteriormente ampliados por Ayers y Westcot (1985) se muestran en la Tabla 2.7.

Tabla 2.7. Valores indicativos de la calidad de agua para riego, considerando los principales parámetros químicos.

VALORES INDICATIVOS DE CALIDAD DE AGUA PARA RIEGO					
Problemas potenciales en el riego		Grado de restricción en el uso			Unidad
		Ninguno	Ligero a moderado	Estricto	
Salinidad, afecta a la disponibilidad de agua para los cultivos.	CE ¹	< 0,7	0,7-3,0	> 3,0	dS m ⁻¹
	SDT ²	< 450	450-2000	> 2000	mg L ⁻¹
Permeabilidad, afecta a la velocidad de infiltración del agua en el suelo. Se evalúa utilizando CE y RAS juntos.	RAS ³ = 0-3	CE: ≥ 0,7	0,7-0,2	< 0,2	dS m ⁻¹
	RAS = 3-6	CE: ≥ 1,2	1,2-0,3	< 0,3	dS m ⁻¹
	RAS = 6-12	CE: ≥ 1,9	1,9-0,5	< 0,5	dS m ⁻¹
	RAS = 12-20	CE: ≥ 2,9	2,9-1,9	< 1,9	dS m ⁻¹
	RAS = 20-40	CE: ≥ 5,0	5,0-2,9	< 2,9	dS m ⁻¹
Toxicidad de iones específicos, afecta a los cultivos sensibles.	Sodio (riego superficial)	< 3	3-9	> 9	RAS
	Sodio (riego con aspersores)	< 70	> 70		mg L ⁻¹
	Cloro (riego superficial)	< 140	140-350	> 350	mg L ⁻¹
	Cloro (riego con aspersores)	< 100	> 100		mg L ⁻¹
	Boro	< 0,7	0,7-3	> 3	mg L ⁻¹
Otros efectos, afectarían a cultivos sensibles.	Nitrógeno (N total)	< 5	5-30	> 30	mg L ⁻¹
	Bicarbonato (aspersores elevados)	< 90	90-500	> 500	mg L ⁻¹
	Cloro residual (aspersores elevados)	< 1,0	1,0-5,0	> 5,0	mg L ⁻¹
pH		Rango Normal 6,5-8,4			

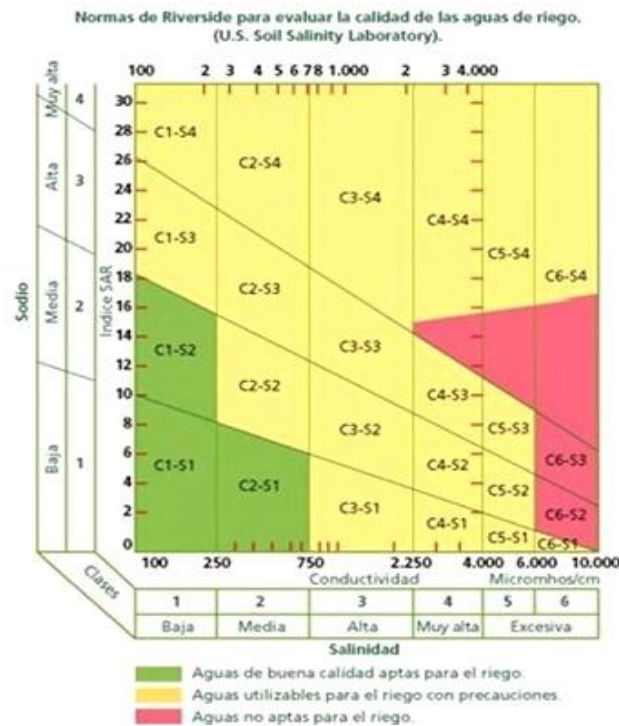
¹CE: conductividad eléctrica del agua de riego.

²SDT: sólidos disueltos totales.

³RAS: relación de adsorción de sodio. Da una idea de la cantidad de sodio presente en el agua de riego en relación con otros cationes y se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$RAS = Na / \sqrt{[(Ca + Mg) / 2]}$$

El U.S. Soil Salinity Laboratory (Riverside, California) en 1954, estableció la clasificación de aguas teniendo en cuenta la conductividad eléctrica. La interpretación práctica que se da a las diversas categorías de peligrosidad salina se basa en la tolerancia de los cultivos a la salinidad y las condiciones de permeabilidad de los suelos frente a la necesidad de riegos de lixiviación para impedir la acumulación salina y se especifica en la Figura 2.6.



- | | |
|----|--|
| C1 | Agua de baja salinidad, apta para el riego en todos los casos. Pueden existir problemas sólo en suelos de muy baja permeabilidad. |
| C2 | Agua de salinidad media, apta para el riego. En ciertos casos puede ser necesario emplear volúmenes de agua en exceso y utilizar cultivos tolerantes a la salinidad. |
| C3 | Agua de salinidad alta que puede utilizarse para el riego de suelos con buen drenaje, empleando volúmenes de agua en exceso para lavar el suelo y utilizando cultivos muy tolerantes a la salinidad. |
| C4 | Agua de salinidad muy alta que en muchos casos no es apta para el riego. Sólo debe usarse en suelos muy permeables y con buen drenaje, empleando volúmenes en exceso para lavar las sales del suelo y utilizando cultivos muy tolerantes a la salinidad. |
| C5 | Agua de salinidad excesiva, que sólo debe emplearse en casos muy contados, extremando todas las precauciones apuntadas anteriormente. |
| C6 | Agua de salinidad excesiva, no aconsejable para riego. |
| S1 | Agua con bajo contenido en sodio, apta para el riego en la mayoría de los casos. Sin embargo, pueden presentarse problemas con cultivos muy sensibles al sodio. |
| S2 | Agua con contenido medio en sodio, y por lo tanto, con cierto peligro de acumulación de sodio en el suelo, especialmente en suelos de textura fina (arcillosos y franco-arcillosos) y de baja permeabilidad. Deben vigilarse las condiciones físicas del suelo y especialmente el nivel de sodio cambiante del suelo, corrigiendo en caso necesario. |
| S3 | Agua con alto contenido en sodio y gran peligro de acumulación de sodio en el suelo. Son aconsejables aportaciones de materia orgánica y empleo de yeso para corregir el posible exceso de sodio en el suelo. También se requiere un buen drenaje y el empleo de volúmenes copiosos de riego. |
| S4 | Agua con contenido muy alto de sodio. No es aconsejable para el riego en general, excepto en caso de baja salinidad y tomando todas las precauciones apuntadas. |

Figura 2.6. Normas de Riverside para evaluar la calidad de las agua de riego.

Además de los parámetros de calidad utilizados para las aguas de riego de origen natural, es importante para las aguas regeneradas, por la naturaleza de este tipo de agua, considerar otros parámetros que se recogen en la Tabla 2.7.

Tabla 2.7. Parámetros para el uso del agua con interés desde el punto de vista agrícola.

Parámetro	Importancia para el regadío	Rango en efluentes procedente del tratamiento secundario y terciario	Objetivo tras el tratamiento para el reuso del agua con fines agrícolas
Sólidos totales en suspensión	La medida de partículas se pueden relacionar con la contaminación microbiana; pueden interferir con la desinfección y ocasionar la obturación de los sistemas de regadío	5-50 mg L ⁻¹	<5-35 mg L ⁻¹
Turbidez		1-30 NTU	<0,2-30 NTU
DBO₅	Substrato orgánico para el crecimiento microbiano; puede generar crecimiento bacteriano en los sistemas de distribución y deposición microbiana	10-30 mg O ₂ L ⁻¹	<5-30 mg O ₂ L ⁻¹
DQO		50-150 mg O ₂ L ⁻¹	<20-150 mg O ₂ L ⁻¹
Nitrógeno	Fertilizantes para regadío; puede contribuir a crecimiento bacteriano y eutrofización de depósitos de almacenamiento, corrosión (N-NH ₄) y/o incrustación (P)	10-30 mg N L ⁻¹	<10-15 mg N L ⁻¹
Fósforo		0,1-30 mg P L ⁻¹	<0,1-2 mg P L ⁻¹

Fuente: Lazarova y Bahri (2005).

A continuación se desarrollan los parámetros con mayor influencia en la calidad del agua regenerada.

a) **Salinidad**

Una excesiva salinidad derivada de la presencia de iones Na, Ca, Mg, Cl o B, pueden producir daños a los cultivos y provocar problemas de permeabilidad en el suelo. La salinidad afecta a la estabilidad estructural del suelo dependiendo del tipo de iones que domina su complejo de cambio, si es el ión sodio el que predomina sobre el

calcio se activa la dispersión de los agregados de arcilla. La relación de adsorción de sodio es la que marca la concentración relativa del ión sodio. Por otro lado, la presión osmótica de la solución ha de ser considerada como sumando del potencial que induce el flujo de humedad hacia la raíz. Cuando su valor es alto (potenciales osmóticos bajos), la raíz encuentra dificultades para absorber agua.

Por todo esto conviene que el contenido en sales sea limitado de manera natural o artificial, por medio de lavados. Los efectos de la salinidad dependen del cultivo y de su desarrollo vegetativo, pero este aspecto ya se ha comentado ampliamente en el apartado 2.2. La fertilidad, aireación, estructura y estado de humedad del suelo tiene influencia en la respuesta del cultivo a la salinidad. Además los efectos salinos son mas acusados cuanto mayor son los valores de radiación y la temperatura ya que se acentúa el factor osmótico.

b) Nutrientes

El aporte extra de elementos nutritivos por parte del agua de riego, en concreto, nitrógeno, fósforo, potasio y ciertos microelementos, reduce las necesidades de fertilización (Asano et al., 1984; Ayers y Wescot, 1985; Ivorra et al., 1997; Asano y Levine, 1998; Segura et al., 2001), aunque se debe prestar especial cuidado a su aplicación excesiva. El nitrógeno y el fósforo son componentes de las aguas residuales urbanas. La cantidad total de nitrógeno después de un tratamiento secundario varía entre 10 y 60 mg L⁻¹. Esta variación, así como la forma química en que se presenta (nitrógeno amoniacal, nitrógeno orgánico, nitritos y nitratos) depende del tipo y grado de tratamiento dado. Esto es importante ya que si se somete a las aguas a tratamientos secundarios biológicos de fangos activados se obtendrá nitrógeno en forma amoniacal y orgánico, que para que sea asimilado por las plantas debe sufrir un proceso de transformación en el suelo, mientras que si se someten a tratamientos de aireación prolongada se obtendrán nitratos que son rápidamente absorbidos por las plantas. La concentración total de fósforo en el agua tratada con tratamiento secundario oscila entre 6 y 15 mg L⁻¹, equivalentes a 15-35 mg L⁻¹ de P₂O₅. El fósforo, queda retenido en el suelo incrementando progresivamente los niveles de este elemento en el mismo, esto permite disminuir la cantidad de fertilizante aportado con fertilizantes comerciales en años sucesivos.

c) Microelementos y metales pesados

Los microelementos y metales pesados que se encuentran en las aguas residuales depuradas están relacionadas con las actividades que se realizan en el lugar de donde proceden las aguas, es decir, depende de las industrias, de las actividades realizadas en las ciudades, de los detergentes, del lavado de las calles, de la corrosión de las tuberías, etc. En el caso de los metales pesados como el cobre y el zinc no suelen existir problemas porque quedan retenidos por los lodos (García, 1997). El problema con los microelementos se puede originar cuando se encuentran en exceso, ya que en pequeñas cantidades son necesarios en las plantas.

d) pH, sólidos en suspensión y cloro residual

Las aguas depuradas suelen presentar un pH adecuado para el riego de cultivos (entre 6,5 y 8,5) por lo que no presentan ningún problema, salvo por la presencia de vertidos industriales. Los sólidos en suspensión tienen que estar en una baja concentración para que el proceso de desinfección de un efluente secundario tenga la máxima eficacia bactericida (Roldán, 1997). También se pueden producir problemas de obturación de los goteros por presencia de sólidos en suspensión, junto con algas, precipitación de elementos químicos, etc. (Crook, 1991; Nakayama y Bucks, 1991; Ravina et al., 1992, 1997), aunque si el agua es sometida a un tratamiento secundario, los sólidos en suspensión presentan pocos problemas. El filtrado, la cloración del agua o el limpiado de las tuberías son medidas generalmente aplicadas para prevenir la obturación de los goteros (Ravina et al., 1997). El cloro residual en concentraciones superiores a 5 mg L^{-1} de Cl_2 puede producir quemaduras en las hojas cuando el agua se aplica por aspersión.

e) Demanda bioquímica de oxígeno y demanda química de oxígeno

La demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) es la cantidad de oxígeno disuelto requerido por los microorganismos para la oxidación aerobia de la materia orgánica biodegradable presente en el agua. Se mide a los cinco días. Su valor da idea de la calidad del agua desde el punto de vista de la materia orgánica presente y permite prever cuanto oxígeno será necesario para la depuración de esas aguas e ir comprobando cual está siendo la eficacia del tratamiento depurador en una planta.

La demanda química de oxígeno (DQO) es la cantidad de oxígeno que se necesita para oxidar los materiales contenidos en el agua con un oxidante químico (normalmente dicromato potásico en medio ácido). Se determina en tres horas y, en la mayoría de los casos, guarda una buena relación con la DBO₅ por lo que es de gran utilidad al no necesitar los cinco días de la DBO₅. Sin embargo, la DQO no diferencia entre materia biodegradable y el resto y no suministra información sobre la velocidad de degradación en condiciones naturales.

La relación DBO₅/DQO indica la biodegradabilidad de las aguas residuales urbanas. Si la relación es superior o igual a 0,4 son aguas muy biodegradables, si se encuentra entre 0,2-0,4 son aguas biodegradables y si es igual o inferior a 0,2 son aguas poco biodegradables.

2.3.3. Uso de agua regenerada en la agricultura

La aplicación de agua residuales tratadas para el riego de los cultivos en una práctica cada vez más común en los últimos años, posiblemente sea el uso más extendido, por la existencia de numerosas ventajas derivadas del enriquecimiento en nutrientes, implicaciones socio-económicas, reducción de la dosis de aplicación de abonos y posibilidad de gestionar los efluentes de una forma más efectiva (Candela et al., 2007). Numerosos son los estudios que estudian el efecto de la utilización del agua residual regenerada, abarcando un gran abanico de cultivos entre los que incluyen: pastos (Bole y Bell 1978), alfalfa y zanahoria (Rosas et al., 1984; Shahalam et al., 1998), maíz y trigo, (Al-Jaloud et al., 1993; Monserrat, 1993), algodón (Bielorai et al., 1984; Feigi et al., 1984), arboles entre los que se incluyen acacias, eucaliptos, álamos (Tzanakis et al., 2003) y cítricos (Kale y Bal, 1987; Koo y Zekri, 1989; Zekri y Koo, 1993, 1994; Esteller et al., 1994; Maurer et al., 1995; Pedrero y Alarcón, 2009) y cultivos hortícolas (Basiouny, 1984; Rosas et al., 1984; Kirkham, 1986; Neilsen et al., 1989; Ramos et al., 1989; Shahalam et al., 1998; Maloupa et al., 1999; Segura et al., 2001; Kadayifci et al., 2005; Keraita et al., 2007; Rai y Tripathi, 2007; Contreras et al., 2013a, 2013b). Además, se han realizado estudios sobre la influencia de la utilización de diferentes técnicas de riego (superficial y subterráneo) para el empleo de este tipo de agua (Contreras, 2001; Kalavrouziotis et al., 2008), también hay estudios que determinan la calidad final del agua dependiendo del tratamiento de regeneración

aplicado (Pedrero y Alarcón, 2009), así como el efecto (sinérgico o antagónico) de los metales pesados contenidos en el agua residual sobre el crecimiento de las plantas (Kalavrouziotis y Koukoulakis, 2011). Una de las revisiones más recientes es la de Pedrero et al. (2010) que recogen la utilización de agua residual depurada en la agricultura con algunos ejemplos recientes en España y Grecia.

2.3.3.1. Efecto sobre el suelo

Uno de los factores que puede afectar la utilización de agua regenerada para el riego de los cultivos es la alteración de las propiedades químicas del suelo, ya que el mismo puede actuar con filtro natural de contaminantes presentes en el agua, al igual que la planta (Pollice et al., 2004). Ciertos elementos presentes en las aguas regeneradas (sales, nutrientes y metales pesados) pueden además de afectar negativamente el crecimiento del cultivo y producir una acumulación de estos elementos en el suelo con el tiempo (Martínez, 2005; Jahantigh, 2008; Tiwari et al., 2011; Kiba et al., 2012). A continuación se detallan algunos de los parámetros físico-químicos sobre los que la reutilización de aguas residuales puede tener influencia.

a) pH

El efecto del riego sobre el pH del suelo, puede ser moderado o significativo, dependiendo de las condiciones de cultivo y la duración del tiempo de riego. La revisión realizada por Fonseca et al. (2007), muestra diferentes casos en los que el riego con estos efluentes no produce cambios significativos del pH del suelo (Bouwer y Idelovitch, 1987) debido a su elevada capacidad tampón, apreciándose variaciones de baja magnitud (menos de una unidad) y sin importancia práctica sobre la disponibilidad de nutrientes para la planta (Speir et al., 1999). Cuando se riega durante un largo periodo de tiempo se pueden producir aumentos significativos de pH, debido al alto contenido de cationes básicos del efluente tal como Na, Ca y Mg (Schipper et al., 1996) o decrecimientos de pH por efecto de los iones hidrógeno liberados en el proceso de nitrificación (Mohammad y Mazahreh, 2003) y de los ácidos grasos orgánicos producidos en la descomposición de la materia orgánica del suelo (Hayes, 1990).

El rango típico de pH para la mayoría de las aguas residuales municipales oscila entre 6,5 y 8,5. Estos valores son comparables a las aguas naturales y no supone una restricción para su uso en riego (Ayers y Wescot, 1985).

b) Salinidad

Las aguas residuales al igual que las aguas convencionales pueden contener una elevada concentración de sales solubles tales como sodio, magnesio, calcio, cloruros, sulfatos, etc., cuando estas sales pasan al suelo por el riego, se pueden producir una acumulación excesiva en la zona radical de la planta limitando su producción y/o calidad. Si bien, en la mayoría de los casos, la conductividad eléctrica está asociada en una parte importante a la concentración de nutrientes que presentan debido a su origen.

La utilización de este tipo de agua puede producir un incremento en la salinidad del suelo cuando la fertilización realizada es excesiva y no se adapta a las necesidades de los cultivos (Segura et al., 2012), si bien con una fertilización optimizada y adaptada a los requerimientos del cultivo, la salinidad del suelo presenta un valor similar a la que produce el riego con agua de origen subterráneo y así lo demuestran Contreras (2001), Segura et al. (2001) y Martínez et al. (2013).

c) Sodicidad

El uso de aguas residuales para riego de cultivos puede producir una creciente concentración de Na en el suelo (Ramírez-Fuentes et al., 2002). El aumento del sodio intercambiable puede oscilar de 3,5 a 25 veces dependiendo del volumen de agua aplicado (Latterell et al., 1982) y el PSI del 2 al 25% (Balks et al., 1998). Los estudios realizados con el agua regenerada del Bajo Andarax, muestran que la utilización para el riego de hortalizas puede producir ligeros incrementos del nivel de Na en suelo y así se refleja en los trabajos realizados por Contreras (2001), Segura et al. (2001) y Martínez et al. (2013).

d) Carbono orgánico total y nitrógeno total

Los efectos de la utilización de agua regenerada sobre el carbono orgánico total (CT) y del nitrógeno total (NT) del suelo difieren dependiendo del experimento. En la revisión realizada por Fonseca et al. (2007) se documentan aumentos del CT y NT del

suelo con la utilización de aguas residuales tratadas y también reducciones debido a factores tales como: predominio del N en forma mineral en el efluente, rápida mineralización de la fracción de N orgánico del efluente proveniente, en su mayor parte, de algas muertas, mantenimiento de condiciones ideales de humedad y temperatura para la mineralización de la materia orgánica, re-abastecimiento de O₂, baja relación C/N en los efluentes y aumento de la actividad microbiológica del suelo fomentada por la descomposición de la materia orgánica soluble e intensificada con la alta entrada de N de las aguas residuales. La estimulación de la actividad microbiana del suelo con el uso de las aguas residuales tratadas consiste en un aumento de la densidad de grupos de microorganismos como bacterias totales, actinomicetos y hongos. Esta elevada actividad microbiana favorece en muchos casos, un desarrollo radical más extenso y una mejor utilización del N del suelo por la planta. El riego con agua residual tratada puede aumentar la lixiviación de N debido al aumento de la lixiviación del N orgánico del suelo, el cambio en la microbiología del suelo por efecto del riego con las aguas AR están relacionados con un aumento de la actividad microbiológica y una alteración en la poblaciones de grupos funcionales de microorganismos, como resultado de los insumos de nutrientes y C orgánico soluble inmediatamente disponible para los microorganismos. Se han observado cambios en la composición de la población de bacterias amonio-oxidantes implicadas en el proceso de nitrificación, predominando el género Nitrosomonas en los suelos regados con aguas AR y el género Nitrospira en los suelos no tratados.

e) Nitrógeno mineral

El nitrógeno procedente del agua residual puede ser absorbido por la planta, sufrir procesos de desnitrificación o inmovilización en la materia orgánica del suelo o ser lixiviado. El nitrógeno orgánico puede estar en forma disponible si el riego aumenta la razón de mineralización neta de N de la materia orgánica del suelo (Polglase et al., 1995). La mineralización y absorción del N orgánico del suelo son factores de gran importancia en la nutrición de la planta y en la eficiencia de uso de los fertilizantes. Por otra parte, el aporte de N de las aguas regeneradas puede afectar las propiedades del suelo y la calidad de las aguas subterráneas circundantes, si la aplicación excede la extracción del cultivo y la capacidad de eliminación de este elemento a través del

sistema suelo-planta, pudiéndose alcanzar niveles de nitratos en las aguas subterráneas entre 50 y 130 mg L⁻¹ y en la solución del suelo de hasta 25 mg L⁻¹ (Segura et al., 2013).

El N-NH₄⁺ constituye normalmente la forma predominante de nitrógeno en las aguas residuales. A pesar de que la nitrificación de la forma amoniacal en los suelos agrícolas es un proceso rápido, el NH₄⁺ también puede ser electrostáticamente adsorbido por el complejo de intercambio catiónico retrasando la nitrificación. En este contexto, Hook y Kardos (1978) demuestran en suelos forestales en regadío, una mayor lixiviación de N cuando el NO₃⁻ es la forma predominante de N en el efluente. Siendo el N lixiviado menor cuando el NH₄⁺ es la forma predominante. El aumento de la concentración de NO₃⁻ en el suelo puede ser debido a una transformación rápida del N-NH₄⁺ y N orgánico de las aguas residuales a nitrógeno en N-NO₃⁻, a un aumento de la mineralización y nitrificación del nitrógeno orgánico del suelo debido a la aplicación de las aguas residuales tratadas y a la falta de sincronización entre las necesidades de N del cultivo y los aportes de N por el riego.

Un pH alcalino de los efluentes favorece la volatilización del amoníaco (NH₃), y las pérdidas de N del suelo después del riego. La concentración de amonio del efluente, el pH del suelo y la temperatura, son factores que interfieren directamente en el equilibrio entre NH₄⁺ y NH₃ en la solución del suelo y la cantidad de NH₃ que se volatiliza. Así la pérdida de NH₃ del suelo después del riego es más alta durante el día (altas temperaturas) pudiéndose reducir si se aplican riegos cortos y frecuente.

El control del nivel de nitratos en el suelo es crucial, debido a que una alta concentración constituye un riesgo potencial de contaminación de las aguas subterráneas y puede afectar negativamente la calidad del agua para el consumo humano. Por tanto, es recomendable realizar análisis periódicos de dichos niveles en el suelo, ya sea en el extracto saturado o en la disolución extraída con sonda de succión.

f) Fósforo

El fósforo aplicado por las aguas regeneradas puede ser químicamente adsorbido por el suelo, absorbido por el cultivo o lixiviado. El efecto del P de las aguas regeneradas en el suelo depende de su concentración en el efluente y en el suelo, pudiendo actuar éste como sumidero (adsorción>desorción) o como fuente

(adsorción<desorción) retrasando o aumentando la lixiviación de P de la zona superficial. La acumulación y lixiviación de P en el suelo depende de la forma de P aplicada (orgánico o inorgánico), concentración aplicada, pH, volumen de agua lixiviada, absorción de P por la planta y tipo de suelo. Así en suelos de textura arenosa se han detectado aumentos de concentración de P a una profundidad de 30 cm como consecuencia de la movilidad del elemento de la zona superficial a la más profunda con las aguas de lixiviación (Llanderal et al., 2012).

La extracción de P por el cultivo procedente del agua residual, puede minimizar los efectos negativos de elevados niveles de P en la solución del suelo (Hook, 1981). Por otra parte, la capacidad de adsorción específica del suelo para retener P puede contribuir a evitar la lixiviación de P desde la zona de la raíz a capas más profundas.

g) Potasio

El riego con aguas residuales tratadas puede alterar la concentración del K intercambiable del suelo, aumentándola (Al-Nakshabandi et al., 1997) o disminuyéndola por aumento de la concentración de Na del suelo. El aumento de la adsorción de Na favorece la desorción y la lixiviación de K que puede estar directamente relacionado con la CIC del suelo. Así en el caso de aguas de concentraciones bajas de K y altas de Na, el K tiene que ser añadido a través de la fertilización mineral para mantener una adecuada absorción de K por la planta. Este hecho es crucial, especialmente para suelos con baja CIC y baja fertilidad natural (Fonseca et al., 2005).

h) Calcio y Magnesio

El riego con aguas residuales tratadas puede causar cambios en la concentración de Ca, y Mg intercambiables a largo plazo, aumentando su concentración como observaron Falkiner y Smith (1997) en plantaciones forestales y de pastos regados con aguas residuales tratadas.

2.3.3.2. Efecto sobre la planta

Desde el punto de vista agronómico, los efectos que puede generar la utilización de aguas regeneradas sobre la planta son los de mayor importancia. El riego con agua regenerada es una opción en diversos cultivos entre los que se incluyen las hortalizas, ya que puede aumentar el peso fresco y seco, la producción el contenido en nitrógeno y fósforo así como otros nutrientes (Akponikpe et al., 2011). Las aguas regeneradas debido a su origen (aguas residuales urbanas) contienen una elevada carga fertilizante que puede ser aprovechada por las plantas a través del riego, por tanto es de esperar que la reutilización en los sistemas hortícolas protegidos constituya una eficiente estrategia de uso, puesto que estos cultivos presentan elevadas necesidades nutritivas y altas tasas de consumo que van a permitir un máximo aprovechamiento de los nutrientes de los efluentes, así como una reducción del aporte de fertilizantes minerales asegurando unos rendimientos óptimos.

a) Bioproductividad

La adecuada aptitud agronómica de las aguas regeneradas para el riego de cultivos hortícola ha sido estudiada en numerosos trabajos, Mañas et al. (2009) en un estudio realizado sobre lechuga y riego localizado destacan la aceptable calidad agronómica del agua regenerada mostrando efectos similares en el cultivo a los obtenidos con la utilización de agua convencional. De igual manera, Balkhair et al. (2013), en cultivo de lechuga y col, obtuvieron una adecuada producción con la utilización de agua regenerada y sistema de riego localizado subterráneo.

En algunos casos, la utilización de agua regenerada puede proporcionar un incremento en la producción de los cultivos y así lo demuestran numerosos trabajos (Buran et al., 1987; Pérez et al., 1988; Ramos et al., 1989; Mojtahid et al., 2001). El riego con agua residual puede aumentar el peso fresco y seco, así como la producción de fruto (Akponikpe et al., 2011). Chalkoo et al. (2014) encontraron que la utilización de agua residual produjo un incremento en el rendimiento de pimiento con respecto a la utilización de aguas subterráneas. Además obtuvieron que el aumento de dosis de fertilizantes con aguas residuales disminuye el crecimiento y desarrollo de la planta. Coincidiendo con estos autores, Mojtahid et al., (2001) encuentran que la aplicación de agua regenerada para la producción de pimiento proporciona un mayor desarrollo de la

planta que la aplicación del agua convencional, que presentaba mayor salinidad, y obtienen incrementos de producción del 30%.

Diferentes investigaciones realizadas sobre cultivo de maíz, patata, lechuga, olivos y alfalfa coinciden en que el riego con aguas residuales aumenta la producción en comparación con el riego con recursos hídricos naturales (Kouraa et al, 2002; Ahmad y Goni, 2010). Cordonnier y Johnston (1980) obtuvieron un incremento en la producción de soja (354 frente a 205 kg ha⁻¹) utilizando aguas residuales municipales tratadas con respecto al agua de origen subterráneo. Al-Abdulqader y Al-Jaloud (2003) también encontraron un incremento en el rendimiento del 11% y 23% para trigo y alfalfa respectivamente con el uso de aguas residuales. Al-Lahham et al. (2003) estudiaron el efecto de las aguas residuales diluidas con diferentes porcentajes de agua potable sobre la producción de tomate, encontrando un incremento en producción con el aumento del porcentaje de agua residual.

Otros estudios muestran que la utilización de agua regenerada no influye en la bioproductividad del cultivo como es el caso de la utilización de agua regeneradas del Bajo Andarax en Almería, donde la utilización de este tipo de agua muestra producciones similares a la utilización de agua de origen convencional (agua subterránea), y es de destacar que en cultivos sensibles a la salinidad, como es la judía, no produce reducción en las rendimiento, e incluso el agua *per se* sin aporte de nutrientes es suficiente para conseguir producciones rentables (Segura et al., 2012).

Mónica (2013) encontró que la utilización de agua regenerada para la producción de tomate en cultivo sin suelo e invernadero no presenta descensos en la producción y tampoco afecta la calidad del fruto. Además no produce un descenso en el crecimiento del cultivo y conlleva una reducción en el aporte de fertilizantes comerciales.

Por otra parte, Reboll et al. (2000), después de estudiar durante tres años el efecto de la utilización de agua regenerada sobre naranjos Navelina, observaron que ni el crecimiento ni los parámetros de fruto eran afectados por los altos niveles de sodio, cloro y boro presentes en el agua regenerada, no detectando en niveles tóxicos en la concentración foliar de sodio, cloro y boro. Resultados similares fueron obtenidos por

Pedrero y Alarcón (2009) que evaluaron la aplicación de agua regenerada en plantaciones de cítricos de Cartagena (Murcia).

b) Calidad de fruto

La calidad del fruto no parece verse afectada por la utilización de agua regenerada, y así lo demuestran Contreras et al. (2013a) en cultivo de pimiento en invernadero. En esta línea, la utilización de agua regenerada para la producción de naranjas (Navelina) no afecta los parámetros de calidad de fruto (Reboll et al., 2000), coincidiendo con los resultados obtenidos Pedrero y Alarcón (2009) que evaluaron la aplicación de agua regenerada en plantaciones de cítricos de Cartagena (Murcia).

c) Concentración tisular de nutrientes y metales pesados

La presencia de nutrientes y metales pesados presente en el agua regenerada puede generar acumulación de estos elementos en los cultivos, si bien va a depender de la concentración de nutrientes en el agua, así como del cultivo y de las condiciones de desarrollo. El riego con agua residual puede ser utilizado en diversos cultivos entre los que se incluyen las hortalizas, aprovechando el contenido en nitrógeno y fósforo así como otros nutrientes (Akponikpe et al., 2011). Kalavrouziotis et al. (2005, 2008) en cultivo de ajo y de lechuga encuentran que no se produce una acumulación de metales pesados en las hojas de ninguno de los cultivos cuando se utiliza agua regenerada, presentando valores tisulares de metales pesados similares a los obtenidos con el agua convencional.

En cítricos, Aucejo et al. (1997) encuentran toxicidad de boro en una plantación situada en Villarreal (Valencia) regada con una mezcla de agua superficial, agua subterránea y agua residual depurada. Por otra parte, Reboll et al. (2000) después de estudiar durante tres años el efecto de la utilización de agua regenerada sobre naranjos Navelina, observaron que la concentración foliar de sodio, cloro y boro no se situó en niveles tóxicos aunque los niveles de sodio, cloro y boro presentes en el agua regenerada eran elevados. Resultados similares fueron obtenidos por Pedrero y Alarcón (2009) en plantaciones de cítricos.

En cultivo de judía verde desarrollado en invernadero se obtiene que la concentración tisular de nutrientes y metales pesados se ve influenciada por la utilización de agua regenerada, si bien no alcanza niveles tóxicos para el cultivo (Martín et al., 2014), sin embargo en cultivo de pimiento también desarrollado en invernadero la concentración tisular de nutrientes no se ve afectada por el uso de agua regenerada, presentando valores similares de N, P, K, Ca y Mg con respecto al empleo de agua de origen subterráneo (Contreras et al., 2013b).

CAPITULO III

Hipótesis y Objetivos

3.1. HIPÓTESIS DE TRABAJO

El presente estudio pretende contribuir en la mejora de la eficiencia de la fertirrigación en la horticultura intensiva del litoral de Andalucía. En la actualidad, la excesiva aplicación de fertilizantes a los cultivos no proporciona un incremento significativo en los rendimientos y lleva asociado un impacto ambiental negativo que se refleja en los niveles de nitratos presentes en los acuíferos de las zonas productoras y en las elevadas concentraciones de fósforo y potasio registradas en los suelos agrícolas.

Con el elevado nivel de automatización que presentan las instalaciones de fertirriego en estos sistemas productivos y el conocimiento necesario en lo que respecta a la absorción o extracciones de nutrientes realizadas por los cultivos junto con el consumo hídrico de los mismos, el rango de mejora en la optimización de la eficiencia de la fertirrigación es amplio.

Existe información en lo que respecta a las necesidades hídricas de los cultivos hortícolas desarrollados en invernadero en la zona litoral de Andalucía, si bien el conocimiento de las extracciones de nutrientes realizadas por estos cultivos es muy limitado. Por tanto, existe una necesidad patente de determinar las extracciones de dichos cultivos en las condiciones específicas de los sistemas intensivos del sureste andaluz.

Por otra parte, numerosos son los factores que influyen en la absorción de nutrientes que realiza un cultivo, no solo afectan los factores genéticos y medioambientales, también tienen mucha influencia factores tales como el sistema de producción, el tipo de suelo (los invernaderos del sureste de Andalucía emplean en un 80% el sistema de cultivo enarenado), el nivel de nutrientes aplicado, y la salinidad del agua de riego.

Debido a la sobreexplotación de los acuíferos de las zonas productoras, fuente principal de abastecimiento del sistema de producción, se ha originado un deterioro del agua utilizada para riego, en términos de cantidad y calidad, con lo cual se hace necesario producir con aguas de mayor salinidad y buscar otras fuentes alternativas al agua subterránea, como son las aguas de origen residual urbano que sometidas a un

proceso de regeneración aseguren una calidad óptima para su uso en riego de cultivos hortícolas de invernadero.

Por tanto, en este contexto es primordial reducir los insumos de fertilizantes que se aplican a través de la fertirrigación, y por ende disminuir la salinidad de la disolución de fertirrigación y la contaminación medioambiental, planteando la siguiente hipótesis de trabajo:

- La optimización de las dosis de nutrientes en fertirrigación aumentará la eficiencia de uso de los nutrientes y podrá permitir la utilización de aguas de menor calidad agronómica (aguas salinas y regeneradas).

3.2. OBJETIVOS

3.2.1. Objetivo general

El objetivo de esta Tesis Doctoral es profundizar en el conocimiento de la fertilización de los cultivos hortícolas de invernadero estableciendo estrategias de fertirrigación más sostenibles, mediante el ajuste de las dosis de NK o NPK a aplicar y el uso de aguas salinas y regeneradas.

3.2.2. Objetivos específicos

1)- Determinar el efecto de la fertirrigación sobre la productividad, la nutrición de la planta y la eficiencia de uso de los nutrientes, así como su influencia sobre la salinidad del suelo.

Este objetivo se aborda en los Capítulos IV, V, VI, VII, VIII y IX.

Para alcanzar este objetivo se desarrollaron un total de cinco experiencias, dos sobre cultivo de melón (Capítulo IV), y una sobre cultivo de tomate (Capítulos V, VI), pimiento (Capítulos VII, VIII) y judía verde (Capítulo IX) en las que se evaluaron diferentes dosis de NK o NPK aplicadas en fertirrigación. Se determinó la producción y la calidad del fruto, la producción de materia seca total y extracción total de nutrientes realizada por la parte aérea de la planta, así como la distribución de nutrientes en los

diferentes órganos del cultivo. También se determinó el efecto de la dosis fertilizante sobre la salinidad del suelo.

2)- Evaluar el efecto de la calidad del agua de riego sobre la productividad, la nutrición de la planta y la eficiencia de uso de los nutrientes.

Este objetivo se aborda en los Capítulos IV, V, VI, VII, VIII y IX.

Para conseguir este objetivo se realizaron tres experiencias con agua salina, dos sobre cultivo de melón (Capítulo IV) y una sobre tomate (Capítulos V, VI), y dos experiencias utilizando agua regenerada, una sobre pimiento (Capítulos VII, VIII) y otra sobre judía verde (Capítulo IX). Se determinó la producción y la calidad de los frutos obtenidos, la producción de materia seca total y extracción total de nutrientes realizada por la parte aérea de la planta, así como la distribución de nutrientes en los diferentes órganos del cultivo.

3)- Establecer posibles interacciones entre la fertirrigación y la calidad del agua de riego en la productividad, la nutrición de las plantas y la eficiencia de uso de los nutrientes.

Este objetivo se aborda en los Capítulos IV, V, VI, VII y VIII.

Para conseguir este objetivo se realizaron cuatro ensayos, dos sobre melón (Capítulo IV), y uno sobre tomate (Capítulos V, VI) usando agua salina y uno sobre pimiento utilizando agua regenerada (Capítulos VII, VIII). Se determinó la producción y la calidad de los frutos obtenidos, la producción de materia seca total y extracción total de nutrientes realizada por la parte aérea de la planta, así como la distribución de nutrientes en los diferentes órganos aéreos del cultivo.

4)- Optimizar las estrategias de fertirrigación determinando unas dosis de nutrientes óptimas en función de la calidad del agua y basadas en la respuesta productiva del cultivo y la eficiencia de uso de nutrientes.

Este objetivo se aborda en el Capítulo X (discusión).

Se determinaron las dosis optimas de NK o NPK considerando los resultados obtenidos de productividad y eficiencia de uso de nutrientes en las cinco experiencias desarrolladas (Capítulos IV, V, VI, VII, VIII y IX) para cada uno de los cultivos (melón, tomate, pimiento y judía verde).

CAPÍTULO IV

Growth and Nutritional Response of Melon to Water Quality and Nitrogen Potassium Fertigation Levels under Greenhouse Mediterranean Conditions



Growth and Nutritional Response of Melon to Water Quality and Nitrogen Potassium Fertigation Levels under Greenhouse Mediterranean Conditions

J. I. CONTRERAS,¹ B. M. PLAZA,² M. T. LAO,²
AND M. L. SEGURA¹

¹Institute of Research and Training in Agriculture and Fisheries (IFAPA), Junta of Andalusia, Almería, Spain

²Department of Crop Production, Higher Polytechnic School, University of Almería, Spain

The Mediterranean area has been experiencing an extensive development of intensive horticulture, with a majority of that located in arid and semi-arid regions with limited water resources and poor water quality. One of the most important greenhouse vegetable crops is melon. This article studies the effects of different nitrogen–potassium (N–K) fertilizers applications and two types of irrigation water on yield and nutritional behavior of melon crop Cucumis melo L. (var. cantalupensis Naud. Alpes). The trial was conducted during two cycles under Mediterranean greenhouse conditions, on sandy mulching soil. The experimental design was bifactorial: NK fertigation and water quality, with three nutrition levels and two water qualities [MS with electrical conductivity (EC) = 0.6 dS m⁻¹ and HS with EC = 2.3 dS m⁻¹]. During the first cycle, the fertigation levels were F₁ (50% NK), F₂ (100% NK), and F₃ (125% NK). In the second cycle, the fertigation levels were F₂, F₄ (125% N and 150% K) and F₅ (180% N and 220% K). Treatment F₂ was the recommended total doses (220 kg N ha⁻¹ and 355 kg K ha⁻¹). The increase in the NK concentration of the nutritive solution produced a rise in commercial production. The salinity of irrigation water did not affect marketable yield but had an effect on the fruit size, which was compensated for by an increase in the amount of fruit produced. Dry-matter production, N, and K uptake by plant (g m⁻²) were evaluated in the first and second trials. Salinity and NK nutrition levels significantly affected (P < 0.05) dry matter and N and K uptake by melon plant. Nitrogen and K uptake present interesting correlations with production and with each other, as established by mean regression analysis.

Keywords Dry matter, NK rates, N and K uptake, sand-mulched soil

Introduction

The greatest concentration of covered crops in the world is in the Mediterranean area, particularly Almería with 27,000 ha. The most common cropping techniques are sand-mulched soils, fertigation, and use of irrigation groundwater with high electrical

Address correspondence to M. L. Segura, Institute of Research and Training in Agriculture and Fisheries (IFAPA), Junta of Andalusia, Camino San Nicolás n. 1, 04745 La Mojónera, Almería, Spain. E-mail: marial.segura@juntadeandalucia.es

conductivity (EC; 2.0–4.5 dS m⁻¹) and high sodium chloride (NaCl) concentrations (500–1000 mg L⁻¹ Cl⁻ and 250–2700 mg L⁻¹ Na⁺) as a result of seawater intrusion. These waters are conventionally classified as having moderate to severe restrictions for the irrigation of crops (Ayers and Westcot 1987). Melons have been studied in arid and semi-arid regions with saline water (Meiri, Plaut, and Pincas 1981). According to the Maas and Hoffman (1977) classification, *Cucumis melo* is moderately salt-tolerant, showing a basal salinity of 1 dS m⁻¹ and a productivity loss of 8.4% per increase of electrical conductivity unit (Mangal, Hooda, and Lal 1988). Supplementing soil with nitrogen (N) improved plant growth under salt stress (Dubey and Pessarakli 1995), and high potassium (K⁺) / sodium (Na⁺) ratios are also closely related to salt resistance in different crops (Lopez and Satti 1996; Ozcan et al. 2000). Under greenhouse conditions, nitrate and K leaching must be considered (Gil Carrasco et al. 2003). An efficient use of fertigation requires good knowledge of the plant nutrient uptake under optimum yield conditions (Bar-Yosef 1986).

Panagiotopoulos (2001) essayed concentrations of 50, 125, and 200 mg L⁻¹ N in a factorial combination with 100 and 200 mg L⁻¹ K₂O in the irrigation water, showing the greatest N treatment fruit swelling. Mehmet and Köseoglu (2005) worked with different levels of K in fertigation and concluded that 300 mg L⁻¹ of K in the root zone was sufficient for optimum yield of greenhouse-grown *Galia* melons. However, results show that it is possible to improve fruit quality by applying 600 mg L⁻¹ additional K to the plants without any reduction in yield. In Turkey, Kaya et al. (2007) improved salt tolerance of melon grown in a mixture of peat, perlite, and sand by addition of potassium nitrate under greenhouse conditions.

Little information is available with regard to the effect of the fertigated NK concentration on yield and nutrient uptake by melon growing on sand-mulched soils and greenhouse conditions of southeastern Spain. This work studied the effect of different NK concentrations applied by fertigation with two irrigation water qualities on melon yield and nutritional status.

Material and Methods

Plant Culture and Treatments

Two experiments under the same experimental conditions were conducted in a 1700-m² polietilene greenhouse located at the Institute of Research and Training in Agriculture and Fisheries of Almería. The soil was a sand-mulched sandy-loam soil (Lao 2004), standard cropping system of the area, with alkaline pH, medium organic-matter contents (1.97%), low assimilable K (168 mg kg⁻¹), and high mineral N (60 mg kg⁻¹) and assimilable P (86 mg kg⁻¹) with *Cucumis melo* L. var. *reticulatus* Naud *Galia* cv *Alpes*. Fertigation was by drip irrigation. Dosage was established as a function of ETc (Fernández 2000) and frequency by tensiometer (matricial potential of -15 KPa) equal for all treatments with a total water volume of 282 L and 407 L per cycle for trials 1 and 2, respectively. The first trial started on 14 March for 119 days, with a plant density of 1 plant m⁻². Temperature range was 17–46 °C, and relative humidity range was 23–88%. The second trial started on 25 February for 139 days, with a plant density of 1.33 plant m⁻². Temperature range was 12–37 °C, and relative humidity range was 27–81%.

A 3 × 2 factorial design was established in four randomized blocks and a total of six treatments. Established treatments were combinations of two factors, NK level and water quality. In the first trial, factor 1 (level of NK applied) was F₁ (50%), F₂ (100%), and F₃ (125%). The recommended level F₂ corresponded to 220 kg N ha⁻¹ and 355 kg K ha⁻¹

Table 1
Irrigation water characteristic (MS, medium salinity water, and HS, high salinity water)

Parameter	MS	HS
pH	7.93	8.20
CE (dS m ⁻¹)	0.61	2.64
CO ₃ ²⁻ (mmolc L ⁻¹)	0.09	0.08
HCO ₃ ⁻ (mmolc L ⁻¹)	2.90	2.38
Cl ⁻ (mmolc L ⁻¹)	2.07	17.38
SO ₄ ²⁻ (mmolc L ⁻¹)	1.11	2.92
NO ₃ ⁻ (mmolc L ⁻¹)	0.52	2.81
H ₂ PO ₄ ⁻ (mmolc L ⁻¹)	0.00	0.00
NH ₄ ⁺ (mmolc L ⁻¹)	0.00	0.00
Ca ²⁺ (mmolc L ⁻¹)	2.25	3.62
Mg ²⁺ (mmolc L ⁻¹)	3.15	8.30
Na ⁺ (mmolc L ⁻¹)	1.30	13.31
K ⁺ (mmolc L ⁻¹)	0.17	0.32
SAR	0.79	5.45
USDA clasification	C ₂ S ₁	C ₄ S ₂

recommended by Rincon et al. (1998). Factor 2 was medium salinity level MS (0.6 dS m⁻¹) and high salinity level HS (2.6 dS m⁻¹) (Table 1). In the second trial, factor 1 (level of NK applied) was F₂ (the same NK level as in the first trial), F₄ (125% N and 150% K), and F₅ (180% N and 220% K), and factor 2 was the same quality water as in the first experience.

The marketable yield of harvested fruit was evaluated per categories and caliber (C₁ in the range 1200– 800 g and C₂ in the range 800–500 g) (CE 1093/97 and CE 850/200 regulation) for 10 plants per replication.

Preparation and Plant Analyses

Whole plants, excluding the roots, were harvested to the end of experiments (119 days for first trial and 139 days for second trial). Eight plants per treatment were randomly selected for destructive sampling and separated into different plant fractions in both experiments: developing fruits, leaves, and stem. Harvested fruits (fruit) were randomly selected every harvesting, and 16 fruits per treatment were collected in both experiments. Fresh samples for the different plant parts were dried at 70 °C to constant weight, and the total mineral content were determined in dry-matter samples. Nitrogen was determined by the micro-Kjeldahl procedure. The plant material dry was ashed at 470 °C, and hydrochloric acid (HCl) solution of the ash was prepared. Potassium concentration in the acid solution was determined by atomic absorption spectrometry (Unican 969 AA spectrometer, Thermo Fisher Scientific, Waltham, Mass.).

Data Analysis

Data were analyzed using analysis of variance (ANOVA) for a 2 × 3 factorial design in four complete randomized blocks. A multifactor ANOVA was also performed to identify

the significant factors (irrigation water salinity and NK level) and interactions between the factors. Date percentage was transformed with inverse sign $\sqrt{}$ to obtain a normal distribution. For each analysis, when ANOVA was significant, statistically significant differences between means were identified using the least significant difference (LSD) test ($P \leq 0.05$, $P \leq 0.01$, $P \leq 0.001$). Simple regression models between N and K extractions and productions as well as between N and K extractions related to data of two trials were carried out. Statistical analyses were performed with Statgraphics Plus v. 5.1 (Statgraphics, Warrenton, Va.).

Results and Discussion

Fruit Production

Increasing salinity of irrigation water from 0.6 to 2.6 dS m⁻¹ did not affect marketable and unmarketable yield of fruit (Table 2) but did affect marketable fruit size. When salinity

Table 2
Marketable yield by caliber, unmarketable yield, and total melon
yield (g m⁻²) for trials 1 and 2

	Marketable yield				
Parameter	Caliber 1 (g m ⁻²)	Caliber 2 (g m ⁻²)	Total (g m ⁻²)	Unmarketable yield (g m ⁻²)	Total yield (g m ⁻²)
Trial 1					
NK level	**	*	**	ns	***
F ₁	1036 b	1799 b	2835 c	20.80	2856 c
F ₂	2344 a	1937 b	4280 b	27.08	4307 b
F ₃	2526 a	2533 a	5059 a	51.56	5111 a
Water salinity	**	*	ns	ns	ns
MS	2321 a	1747 b	4068	33.24	4102
HS	1616 b	2432 a	4048	33.06	4081
Interaction	ns	ns	*	ns	*
Trial 2					
NK level	***	ns	***	ns	***
F ₂	2113 c	2062	4175 c	241.1	4416 c
F ₄	3254 b	2180	5434 b	154.2	5588 b
F ₅	3591 a	2505	6095 a	186.8	6282 a
Water salinity	***	***	ns	ns	ns
MS	3824 a	1423 b	5246	212.2	5458
HS	2148 b	3076 a	5223	175.8	5399
Interaction	ns	ns	ns	ns	Ns

Notes. ns, no significance. Different letters describe significant differences between group columns.

*Significance for $P < 0.10$.

**Significance for $P < 0.05$.

***Significance for $P < 0.01$.

Table 3
Marketable number of fruits by caliber, unmarketable number of fruits,
and total melon number of fruits (units m⁻²) for trials 1 and 2

Parameter	Marketable fruit number			Unmarketable fruit number (units m ⁻²)	Total fruit number (units m ⁻²)
	Caliber 1 (units m ⁻²)	Caliber 2 (units m ⁻²)	Total (units m ⁻²)		
Trial 1					
NK level	**	*	***	ns	***
F ₁	1.25 b	2.48 b	3.74 c	0.08	3.82 c
F ₂	2.08 a	2.63 b	4.71 b	0.08	4.79 b
F ₃	2.40 a	3.42 a	5.82 a	0.13	5.95 a
Water salinity	**	**	ns	ns	ns
MS	2.30 a	2.37 b	4.67	0.11	4.77
HS	1.52 b	3.32 a	4.84	0.09	4.93
Interaction	ns	ns	ns	ns	ns
Trial 2					
NK level	***	ns	***	ns	***
F ₂	2.06 c	2.99	5.05 c	0.67	5.71 c
F ₄	3.12 b	3.20	6.32 b	0.44	6.76 b
F ₅	3.55 a	3.69	7.24 a	0.53	7.77 a
Water salinity	***	***	**	ns	**
MS	3.70 a	2.16b	5.86 b	0.60	6.46 b
HS	2.11 b	4.43 a	6.54 a	0.49	7.04 a
Interaction	ns	ns	ns	ns	ns

Notes. ns, no significance. Different letters describe significant differences between group columns.

*Significance for $P < 0.10$.

**Significance for $P < 0.05$.

***Significance for $P < 0.01$.

increased, fruit number and weight of caliber 1 fruits decreased, and fruit number and weight of caliber 2 fruit increased (Table 3). In the first cycle, the fruit yield and number of fruits of caliber 2 were about 40% greater in HS treatment than in MS treatment. In the second cycle, the decreases were 116% and 105%, respectively. In contrast, in the first trial, yield and fruit number of caliber 1 decreased by 30% and 34%, respectively, and by about 44% in the second trial. These results could be related to salt tolerance. Botía et al. (2004) considered that marketable yield was reduced in salt-tolerant melon varieties. The small size of fruit under salinity conditions has been described by Meiri, Plaut, and Pincas (1981) and Mendlinger and Pasternak (1992). The results obtained from this experiment differed from those observed by Kaya et al. (2007), who reported very high salinity (150 mM NaCl) reduced fruit yield grown in mixture of peat, perlite, and sand under greenhouse conditions.

The NK level had a significant effect on yield parameters in both years, increasing yield and fruit number by increasing of NK concentration (Table 2). In the first year, significant marketable yield reduction (28%) was recorded with low NK level (F₁) compared to the recommended treatment (F₂). The recommended treatment (F₂) obtained in both

cycles a marketable production similar to standard yields of the production area (3–4 kg m⁻²) (Consejería de Agricultura y Pesca 2004). Yields obtained with F₃, F₄, and F₅ treatments were greater and increased the marketable yields by 18%, 30%, and 46%, compared to control treatment F₂. Unmarketable production was low in general and had no significant difference between treatments. These results agree with Criado (2000), who obtained high productions when NK fertilization level increased under plastic greenhouses. Segura et al. (2009) obtained similar results in the same conditions as the tomato crop. Other authors (Buzetti et al. 1993; Coelho et al. 2001) observed fruit yield increases caused by higher N doses. The increase of NK fertilization level caused marketable and total fruit numbers to increase (Table 3) in both experiments. These results are consistent with those obtained by Lima et al. (2007), who increased the dose of N from 0 to 150 kg ha⁻¹. The increase in production and number of fruit appears to be mainly associated with increasing N levels, because it is the nutrient that has more influence on the production and export cytokinins (Marchner 1995) and photosynthetic function (Grindlay 1997). However, adequate K nutrition was associated with increased yields, fruit size, and biomass production of many horticultural crops (Geraldson 1985; Kanai et al. 2007; Segura et al. 2009). Demiral and Köseoglu (2005) found that different rates of K (200 to 600 mg L⁻¹) had no effect on melon yield, probably as a result of the high K content of the greenhouse soil, but in this experiment the level of K in soil was low. Recently, Lester, Jifon, and Makus (2010) found a positive effect on yield in muskmelon of various K fertilizer sources applied to foliage.

In general, there was no effect of the interaction between NK levels and water salinity.

Dry Matter and Nutrient Total Uptake by Plant

Data on bioproductivity and N and K extraction by aerial plant are shown in Table 4. Water salinity had no significant effect on the dry-matter content. In both years, dry matter was 567 and 579 g m⁻² in the first year and 906 and 969 g m⁻² in the second year for medium salinity and high salinity water respectively. Increasing the concentration of NK significantly enhanced dry-matter production in both years. Low-NK treatment (F₁) decreased dry-matter production by 34%, and the highest NK fertilizer treatments (F₃, F₄ and F₅) increased dry matter of aerial plant by 25%, 30%, and 52% respectively compared to control treatment F₂.

The NK treatments studied showed significant differences in amounts of N and K taken up by aerial plant parts. The greatest NK fertilizer treatments, F₃, F₄, and F₅, presented the greatest uptake of N and K, related to a greater production of plant dry matter (Table 4). On the other hand, the lowest N and K uptake level could be observed with the F₁ treatment and resulted in lesser marketable yield and dry-matter production. The increase of the total nutrient uptake with these treatments compared to F₂ ranged between 30% N and 32% K in F₃ and 118% N and 97% K in F₅.

Under N fertilization, Chen et al. (2010) found that N uptake increased with N fertilization raised into adequate rates, at both low and medium soil salinities, but was not influenced by overfertilization. The uptake of K decreased with soil salinity.

During the first year, no significant differences were observed between salinity treatments in the uptake of N of the aboveground part, but K uptake was reduced 21% in the high salinity treatment compared to the control treatment (MS). However, in the second year, the uptake of N and K were significantly greater in the high salinity treatment, increasing of 29% and 12% respectively.

The interaction of NK fertilizer level and water salinity was significant on plant N and K uptake in the first year (Figure 1). MS-F₃ treatment showed the greatest N and K

Table 4
Nutrient uptake by whole plant and productive efficiency (PE)

Parameter	Uptake			Productive efficiency (PE)		
	Dry matter (g m ⁻²)	N (g m ⁻²)	K (g m ⁻²)	Dry matter (%)	N (%)	K (%)
Trial 1						
NK level	***	***	***	**	***	**
F ₁	389 c	4.86 c	10.04 c	51 b	58 b	54 a
F ₂	591 b	8.36 b	15.96 b	53 a	62 a	55 a
F ₃	738 a	10.91 a	21.11 a	48 c	55 c	45 b
Water salinity	ns	ns	**	***	*	ns
MS	567	8.39	17.50 a	48 b	57 b	50
HS	579	7.69	13.90 b	53 a	59 a	52
Interaction (NK × WS)	ns	*	*	*	*	*
Trial 2						
NK level	***	***	***	**	***	***
F ₂	736 c	11.70 c	21.25 c	83 a	61 a	74 a
F ₄	959 b	18.99 b	31.22 b	79 b	60 a	69 b
F ₅	1117 a	25.50 a	41.83 a	77 c	55 b	65 c
Water salinity	ns	***	ns	ns	ns	***
MS	906	16.33 b	29.67	79	59	67b
HS	969	21.13 a	33.20	80	59	71a
Interaction	ns	ns	ns	ns	ns	Ns

Notes. ns, no significance. Different letters describe significant differences between group columns.

*Significance for $P < 0.10$.

**Significance for $P < 0.05$.

***Significance for $P < 0.01$.

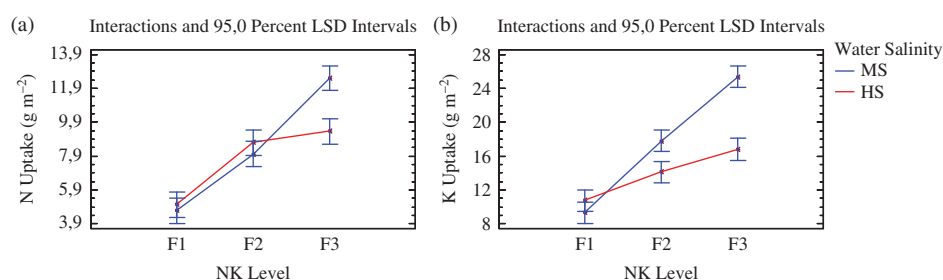


Figure 1. Interaction NK level × water salinity: N (a) and K (b) uptake by melon plant (color figure available online).

uptake, while increasing the salinity of irrigation water and high levels of NK fertilization produced no significant effects on N and K uptake by the plant. Very high levels of NaCl (Kaya et al. 2007) induced a significant decrease in plant N and K uptake, while the application of supplied chemicals enhanced K uptake by melon plants. In this experiment, with

lower levels of salinity, no reduction in the aerial N and K uptake of melon by increasing concentration of NaCl from 1.3 to 13.3 mM was observed.

Productive efficiency (PE) is the percentage of fruit nutrient uptake compared to the total plant uptake, and all treatments showed high PE. However, the greater NK fertilizer level showed significantly lesser PE of dry matter, N, and K compared to recommended NK level. In both years, PEs of the dry matter, N, and K ranged between 51% and 48%, between 58% and 55%, and between 54% and 45%, respectively, in the first year, and between 83% and 77%, between 61% and 55%, and between 74% and 65% in the second year. This reduction shows a significant effect of concentration NK on NK availability for fruit, decreasing demand for the fruit while increases demand for source organs (vegetative organs).

The effects of water quality on accumulation of dry matter and N and K in the fruit were dependent on crop cycle. Increasing salinity of irrigation water from 0.6 to 2.6 dS m⁻¹ increased PEs of dry matter and N by 10.4% and 3.5% respectively, in the first year, and 6% of K in the second year.

The interaction of NK fertilizer level and water salinity was significant on PEs of dry matter, N, and K in first year. Increasing the dose of NK above the recommended concentration resulted in a reduction of PE that was similar in both water types (Figure 2).

Figure 3 shows the strong relationship (R^2 near 1) between N and K aerial total extractions, under different fertilizer treatments as a function of water quality. The slope linear regression under MS was greater than HS. The ratio N/K was greater in HS than in MS. These results could not be related to nitrate (NO₃⁻)/Cl⁻ interaction, because salinity reduces the uptake of N (NO₃⁻) mostly due to high Cl⁻ content of saline soil (Grattan and Grieve 1994; Khan and Srivastava 1998). On the other hand, marketable yield presented high curvilinear correlations (R^2 0.99 and 0.89) with N and K extraction (Figures 4 and 5). Nitrogen and K extractions of more than 23 and 40 g m⁻² do not increase marketable yield.

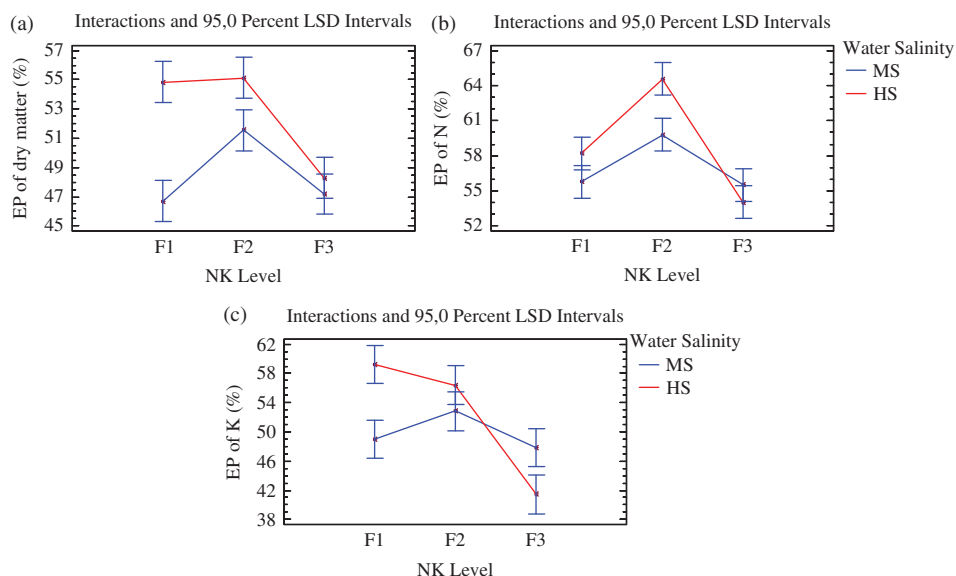


Figure 2. Interaction NK level × water salinity. EP of dry matter (a), N (b), and K (c) by melon plant (color figure available online).

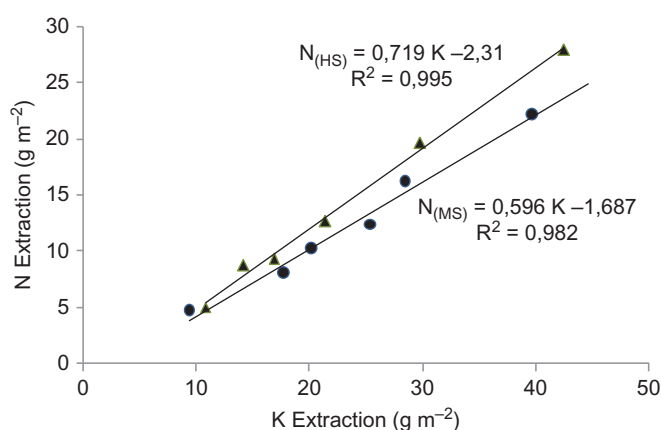


Figure 3. Relationship between N and K crop extraction (color figure available online).

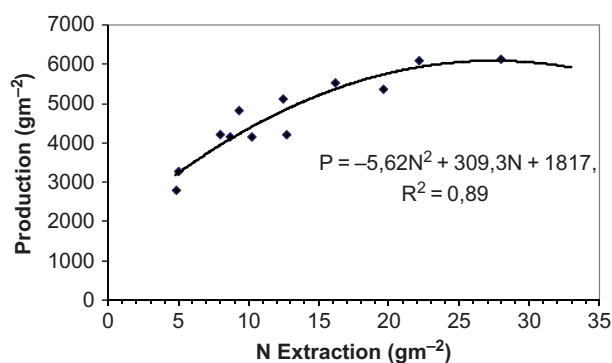


Figure 4. Relationship between N extraction and commercial production (color figure available online).

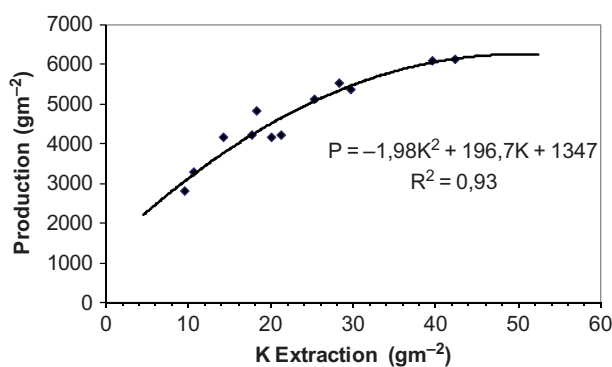


Figure 5. Relationship between K extraction and commercial production (color figure available online).

Conclusions

Under conditions of development experiences, use of irrigation water of 2.6 versus 0.6 dSm⁻¹ electrical conductivity for melon crops did not result in reductions in yield, dry-matter production, and N and K uptake. Salinity decreased melon caliber and fruit weight.

The greatest commercial production, dry-matter production, and NK uptake by plant are obtained with high NK fertilizers levels. Nitrogen and K extractions were strongly correlated with commercial production, and values exceeding 23 g m⁻² of N and 40 g m⁻² of K uptake did not increase production. Salinity increased N/K uptake ratio.

Acknowledgments

This work is part of Project Optimisation of Fertigation of Greenhouse Vegetable Crops, supported by Alboran Agrícola S.A., Yara España S.A., and IFAPA (Junta of Andalusia).

References

- Ayers, R. S., and D. W. Westcot. 1987. Water quality for agriculture. FAO Irrig. Drain. Paper 29. Rev. 1. FAO, Rome, Italy.
- Bar-Yosef, B. 1986. Fertirrigation, a technique to optimize crop yield with special reference to vegetables. *Proceedings of the Third International Conference of Irrigation*, 87–97. Tel-Aviv, Israel.
- Botía, P., J. M. Navarro, A. Cerdá, and V. Martínez. 2004. Yield and fruit quality of two melon cultivars irrigated with saline water at different stages of development. *European Journal of Agronomy* 23 (3): 243–253.
- Buzetti, S., F. B. T. Hernandez, M. E. Sá, and M. A. Suzuki. 1993. Influência da adubação nitrogenada e potássica na eficiência do uso da água e na qualidade de frutos de melão. *Scientia Agrícola, Piracicaba* 50 (2): 419–426.
- Chen, W., Z. Hou, L. Wu, Y. Liang, and C. Wei. 2009. Effects of salinity and nitrogen on cotton growth in arid environment *Plant and Soil* 32(6):61–73.
- Coelho, E. F., V. F. Sousa, V. A. B. Sousa, and F. B. Melo. 2001. Efeitos de níveis de N e K aplicados por gotejamento na cultura do meloeiro (*Cucumis melo* L.) em solo arenoso. *Ciência e Agrotecnologia, Lavras* 25 (1): 23–30.
- Consejería de Agricultura y Pesca. 2004. *Plan del sector hortícola de Almería*. Junta de Andalucía: Ministry of Agriculture and Fisheries of the Junta de Andalucía.
- Criado, F. J. 2000. *Necesidades de agua en un cultivo de melón Galia entutorado en Almería: Proyecto Monográfico Ingeniería Técnica Agrícola en Hortofruticultura y Jardinería*. Almería, Spain: Escuela Politécnica Superior, Universidad de Almería.
- Demiral, M. A., and A. T. Köseoglu. 2005. Effect of potassium on yield, fruit quality, and chemical composition of greenhouse-grown *Galia melon*. *Journal Plant Nutrition* 28:93–100.
- Dubey, R. S., and M. Pessarakli. 1995. Physiological mechanisms of N absorption and assimilation in plants under stressful conditions. In *Handbook of plant and crop physiology*, ed. M. Pessarakli, 605–625. New York: Marcel Dekker.
- Fernández, M. D. 2000. *Necesidades hídricas y programación de riegos en los cultivos hortícolas en invernaderos y suelo enarenado de Almería*. PhD thesis, Universidad de Almería, Spain.
- Geraldson, C. M. 1985. Potassium nutrition of vegetable crops. In *Potassium in agriculture*, ed. R. S. Munson, 915–927. Madison, Wisc.: ASACSSA-SSSA.
- Gil Carrasco, C., J. Ramos, R. Boluda, and P. Picazo. 2003. *Caracterización fisicoquímica y evaluación del estado general de los suelos en invernaderos del poniente almeriense*. Almería, Spain: FIAPA.
- Grattan, S. R., and C. M. Grieve. 1994. Mineral nutrient acquisition and response by plants grown in saline environments. In *Handbook of plant and crop stress*, ed. M. Pessarakli, 203–226. New York: Marcel Dekker.
- Grindlay, D. J. C. 1997. Towards an explanation of crop nitrogen demand based on the optimization of leaf nitrogen per unit leaf area. *Journal of Agricultural Science, Cambridge* 128:377–396.

- Kanai, S., K. Ohkura, J. J. Adu-Gyamfi, P. K. Mohapatra, N. T. Nguyen, H. Saneoka, and K. Fujita. 2007. Depression of sink activity precedes the inhibition of biomass production in tomato plants subjected to potassium deficiency stress. *Journal of Experimental Botany* 58:2917–2928.
- Kaya, C., A. L. Tuna, M. Ashraf, and H. Altunlu. 2007. Improved salt tolerance of melon (*Cucumis melo* L.) by the addition of proline and potassium nitrate. *Environmental and Experimental Botany* 60:397–403.
- Khan, M. G., and H. S. Srivastava. 1998. Changes in growth and N assimilation in maize plants induced by NaCl and growth regulators. *Biologia Plantarum* 41:93–99.
- Lao, M. T. 2004. The mulching sandy soil and their management fertigation in horticultural production. *Trends in Soil Science*. 3:71–82.
- Lester, E. L., J. L. Jifon, and D. J. Makus. 2010. Impact of potassium nutrition on postharvest fruit quality: Melon (*Cucumis melo* L.) case study. *Plant and Soil* 335:117–131.
- Lima, P. S., V. L. Paiva, J. F. de Madeiros, B. F. de Aquino, and J. da Silva. 2007. Yield and quality of melon fruits as a response to application of nitrogen and potassium doses. *Caatinga* 20 (2): 43–49.
- Lopez, M. V., and S. M. E. Satti. 1996. Calcium and potassium-enhanced growth and yield of tomato under sodium chloride stress. *Plant Science* 114:19–27.
- Maas, E. V., and G. J. Hoffman. 1977. Crop salt tolerance—Current assessment. *Journal of the Irrigation and Drainage Division* 103 (2): 115–134.
- Mangal, J. L., P. S. Hooda, and S. Lal. 1988. Salt tolerance of five muskmelon cultivars. *Journal of Agricultural Science* 110:641–643.
- Marschner, H. 1995. Functions of mineral nutrients: Macronutrients. In *Mineral nutrition of higher plants*, 2nd ed., ed. H. Marschner, 299–312. New York: Academic Press.
- Mehmet, A. D., and A. Turgut Köseoglu. 2005. Effect of potassium on yield, fruit quality, and chemical composition of greenhouse-grown Galia melon. *Journal of Plant Nutrition* 28 (1): 93–100.
- Meiri, A., Z. Plaut, and L. Pincas. 1981. Salt tolerance of glasshouse-grown muskmelon. *Soil Science* 131 (3): 189–193.
- Mendlinger, S., and D. Pasternak. 1992. Effect of time of salinization on flowering, yield, and fruit quality factors in melon, *Cucumis melo* L. *Journal of Horticultural Science* 67 (4): 529–534.
- Ozcan, H., M. A. Turan, O. Koc, Y. Cikili, and S. Taban. 2000. Growth and variations in proline, sodium, chloride, phosphorus, and potassium concentrations of chickpea varieties under salinity stress. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry* 24:649–654.
- Panagiotopoulos, L. 2001. Effects of nitrogen fertigation on growth, yield, quality, and leaf nutrient composition of melon (*Cucumis melo* L.). *Acta Horticulturae (ISHS)* 563:115–121.
- Rincón, L., J. Sáez, J. Pérez, C. Pellicer, and M. Gómez. 1998. Crecimiento y absorción de nutrientes del melón bajo invernadero. *Investigación Agraria Producción Vegetal* 13:111–120.
- Segura, M. L., J. L. Contreras, R. Salinas, and M. R. Lao. 2009. Influence of salinity and fertilization level on greenhouse tomato yield and quality. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 40 (3): 485–497.

CAPÍTULO V

Influence of Salinity and Fertilization Level on Greenhouse Tomato Yield and Quality



Communications in Soil Science and Plant Analysis, 40: 485–497, 2009

Copyright © Taylor & Francis Group, LLC

ISSN 0010-3624 print/1532-2416 online

DOI: 10.1080/00103620802697764

Influence of Salinity and Fertilization Level on Greenhouse Tomato Yield and Quality

M. L. Segura,¹ J. I. Contreras,¹ R. Salinas,² and M. T. Lao²

¹Institute of Agricultural and Fishing Investigation and Training (IFAPA), Junta of Andalusia, Almería, Spain

²Department of Vegetal Production, Higher Polytechnic School, University of Almería, Almería, Spain

Abstract: The objective of this study was to evaluate the effects of two irrigation water qualities and three different levels of nitrogen–phosphorous–potassium (NPK) rates applied by fertigation on yield and quality of tomato fruit. The experiment was carried out in a polyethylene greenhouse on ‘Pitenza’ tomato grown on a sand-mulched sandy loam soil using a trickle irrigation system. The treatment consisted of two irrigation water qualities (C₂S₁ and C₃S₂) and three fertilization levels: 50%, 100%, and 200% [7.1 mmol L⁻¹ nitrate (NO₃) N, 0.5 mmol L⁻¹ P, and 3.1 mmol L⁻¹ K] for each water quality category. The dry-matter content of fruit (DMC), number of fruit, fruit weight per period (g), weight per fruit (g), number of trusses, fruits per truss, and unmarketable fruit were monitored. Quality was evaluated using fruit firmness (Kg), total soluble solids (°Brix), pH, and titratable acidity (meq citric acid L⁻¹ of juice). The increased salinity of the irrigation water did not affect the marketable and unmarketable yield of fruit but did produce an increase in the number of fruits per truss at 127 days after transplanting (DAT) (10%) and in the DMC percentage at 127 and 179 DAT, being 9 and 6.8% respectively. High-salinity irrigation water reduced the firmness of the fruit at 127 and 179 DAT (9% and 22%, respectively); it increased the soluble solids for all the dates analyzed as well as the fruit’s titratable acidity with significant differences at 127 and 206 DAT. The fertilization level increased the marketable yields, fruit number, and number of trusses during all stages.

Address correspondence to M. L. Segura, IFAPA Centro La Mojonera, Consejería de Agricultura y Pesca, Junta de Andalucía, Camino San Nicolás, no. 1, 04745 La Mojonera, Almería, Spain. E-mail: marial.segura.ext@juntadeandalucia.es

Treatment F₁ produced a yield 28% lower than F₂, whereas F₃ was 10% higher than F₂. The results show that irrigation water electrical conductivity (EC) of 2.2 dS m⁻¹ is adequate for high yield and quality of tomato in the commercial cycle.

Keywords: Fertigation, greenhouse, pH, salinity, sand mulch, titratable acidity, total soluble solids

INTRODUCTION

Tomato is one of the main vegetable crops and is the highest value horticultural crop (Nuez, Llacer, and Ruiz 2002). The quality of the fruits is controlled by the interaction of genetic, environmental, and cultural factors, including plant nutrition (Dorais, Papadopoulos, and Gosselin 2001). Nutrient concentration and water salinity have an influence on yields and quality of tomato fruits (Dorais and Papadopoulos 2000). Among essential plant nutrients, potassium (K) has the largest ion uptake by tomato plants and could be considered key for quality fruit production (Mengel and Kikby 2001; Marscher 1995). Most tomato studies have shown that increasing the electrical conductivity (EC) of the nutritional solution improves fruit quality (Adams and Ho 1989; Gough and Hobson 1990; Chapagain and Wiesman 2004), and using saline water for irrigation increases water productivity by freeing up fresh water that can be allocated to domestic or other uses (Karlberg et al. 2007).

An efficient use of the fertigation technique requires good knowledge of plant nutrient uptake under optimum yield conditions (Bar-Yosef 1986). Lower concentrations may reduce plant production and higher concentrations may produce some nutrient imbalances due to nutrient interaction (Grattan and Grieve 1999) and thus reduce yield. When the fertilizer rates applied are greater than those that produce the maximum yield [and therefore the nitrate (NO₃⁻) nitrogen (N) uptake by the plant] or when their application time is out of phase with plant uptake, the residual NO₃⁻-N in the soil increases rapidly, as do the losses, especially through leaching (Pratt 1984; Chaney 1990; Bock and Hergert 1991; Ramos 1996; Gioacchini et al. 2002). Not much information is available with regard to the effects of fertigated N-phosphorous-potassium (NPK) concentration on yield and organoleptic properties of tomato fruit growing on sand-mulched soils.

The objective of this study was to evaluate the effects of two irrigation water qualities and three different levels of NPK rates applied by fertigation on yield and quality of tomato fruit.

MATERIALS AND METHODS

Plant Culture and Treatments

The experiment was conducted in a 1700-m² polyethylene greenhouse on a sand-mulched sandy loam soil with trickle irrigation (the standard cropping system of the area), located at the Instituto de Investigación y Formación Agraria (IFAPA), La Mojonera, Almería, Spain (longitude 2° 41' W, latitude 36° 47' N, elevation 160 m). Tomato plants (*Lycopersicon esculentum* Mill., cv. 'Pitenza') were transplanted on 9 October 2004 with a plant density of 1.6 plants m⁻² and an autumn–spring growing cycle (206 days). The daily average temperatures during the experiment were as follows: maximum temperature 30 °C, midtemperature 17 °C, and minimum temperature 11 °C.

Experimental design was two factorial with four randomized blocks, six treatments resulting from the combination of two irrigation water qualities WQm (C₂S₁) and WQh (C₃S₂), and three fertilization levels of nutrients: F₁ (half of the recommended rate), F₂ (the recommended rate), and F₃ (double the recommended rate). The nutrients were applied by means of fertigation with a trickle-feed irrigation system with a capacity of 3 L h⁻¹, independent for each of the treatments. The composition of irrigation waters and nutrient solutions are specified in Table 1. The recommended rate (F₂) represented the following average nutrient concentration: 7.1 mM of NO₃⁻-N, 0.5 mM of phosphoric acid (H₂PO₄⁻)-P, and 3.1 mM of K⁺ corresponding to 36.7 g m⁻² of N, 5.4 g m⁻² of P, and 44.8 g m⁻² of K under local conditions (Castilla 1986).

The soil characteristics were alkaline pH (8.54), organic-matter contents of 1.97%, available K of 168 mg kg⁻¹ (low), high mineral N [NO₃⁻-N plus ammonium (NH₄⁺)-N] of 60 mg kg⁻¹, and available P (86 mg kg⁻¹). Soil pH was determined with a glass electrode in saturated paste extract (MAPA 1994). Soil organic matter was determined using the Walkley–Black method (Black 1965). Soil available K was determined by extraction with ammonium acetate following the Thomas method (1982) using atomic absorption spectrometry (Unican 969 AA Spectrometer, Thermo Fisher Scientific, Waltham, Mass.). Nitrate was determined by means of colored complexes with brucine acid (Baker 1969) and ammonium based on the formation of blue-colored complexes of indophenol (Koroleff 1970). Soil available P was determined by extraction with sodium bicarbonate (Olsen et al. 1954).

Data Recorded

Tomato fruit production was evaluated according to the following parameters: total fruit weight by period (g), total number of fruits, weight

Table 1. Irrigation water and nutrient solution characteristics

Saline content	EC (dSm ⁻¹)	Cl ⁻ (mM)	SO ₄ ²⁻ (mM)	NO ₃ ⁻ (mM)	H ₂ PO ₄ ⁻ (mM)	Na ⁺ (mM)	Mg ²⁺ (mM)	Ca ²⁺ (mM)	K ⁺ (mM)	SAR ^a	USDA classification
WQm	0.6	2.1	0.6	0.6	0.0	1.5	1.7	1.2	0.1	0.9	C ₂ S ₁
WQh	2.2	15.5	1.3	2.5	0.0	12.3	4.2	2.0	0.2	4.9	C ₃ S ₂
WQm F ₁	1.1	2.1	0.6	3.6	0.3	1.5	1.7	2.1	1.6	0.8	
WQm F ₂	1.4	2.1	0.6	7.1	0.5	1.5	1.7	2.8	3.1	0.7	
WQm F ₃	2.1	2.1	0.6	14.2	1.0	1.5	1.7	3.7	6.2	0.6	
WQh F ₁	2.6	15.5	1.3	3.6	0.3	12.3	4.2	2.1	1.6	4.9	
WQh F ₂	3.0	15.5	1.3	7.1	0.5	12.3	4.2	2.8	3.1	4.7	
WQh F ₃	3.7	15.5	1.3	14.2	1.0	12.3	4.2	3.7	6.2	4.4	

^aSodium absorption ratio.

Notes. WQm: medium-salinity water; QWh: high-salinity water.

per fruit (g), percentage of dry matter content of fruit (DMC), total number of trusses, number of fruits per truss, and unmarketable fruit. Weekly ripe fruit harvests started 20 weeks after planting and continued for 89 days. Data were recorded 127, 179, and 206 days after transplanting (DAT). For each date, 10 plants for yield parameters and four fruit per experimental replication plot were collected as samples for DMC. Fresh samples of fruit were dried at more than 70 °C to constant weight, as dry-matter content was determined using dry-matter samples.

Tomato fruit quality was evaluated taking into account firmness (Kg), total soluble solids (°Brix), pH, and tritable acidity (meq citric acid L⁻¹ of juice). The measurement of fruit quality was conducted three times during the harvest period (127, 179, and 206 DAT) on samples formed by four fruit per experimental replication plot. Two opposite slices from each fruit were homogenized, and the filtered juice was used for soluble-solids content (SSC) measured by an Atago N1 Refractometer (Atago Co. Ltd., Tokyo, Japan) and expressed as °Brix at 20 °C and total tritable acidity (TA) by AOAC (1990). The pH value of tomato juice was determined with a pH meter, and firmness was determined with a penetrometer (AOAC 1990).

Data Analysis

Data were analyzed using analysis of variance (ANOVA) for a 2 × 3 factorial design in four completely randomized blocks. A multifactor ANOVA was also performed to identify the significant factors (irrigation water quality and fertilization level) and interactions between the factors.

For each analysis, when ANOVA was significant, statistically significant differences between means were identified using an LSD test ($P < 0.05$). Statistical analyses were performed with Statgraphics Plus 4.1.

RESULTS AND DISCUSSION

Fruit Production

In general, the increased salinity of the irrigation water did not affect the marketable and unmarketable yield of fruit in the different periods (Table 2), though in the period 180–206 days, an increase of the number of fruits was obtained (Table 2) with WQh. The high-salinity irrigation water did not affect the average fruit weight at 127 and 206 DAT; however, it did reduce the average weight of the fruit at 179 DAT by 6.5% (Table 3). Also, the high-salinity irrigation water produced an

Table 2. Marketable yield of tomato fruit, fruit yield, number of fruits, number of trusses, and unmarketable yield

Parameter	Marketable yield			Unmarketable yield (g m ⁻²)
	Fruit yield (g m ⁻²)	Number of fruits (m ⁻²)	Number of trusses (m ⁻²)	
0–127 DAT ^a				
Water quality (WQ)	ns	ns	ns	*
WQm	4528a	36.45a	4.25a	202b
WQh	4526a	37.09a	3.96a	265a
Fertilization level (F)	*	*	*	ns
F ₁	3489c	27.50c	3.28b	265a
F ₂	4815b	38.22b	4.32a	230a
F ₃	5277a	44.60a	4.72a	206a
WQ × F	ns	ns	ns	ns
128–179 DAT				
Water quality (WQ)	ns	ns	ns	ns
WQm	2319a	21.20a	2.56a	183a
WQh	2210a	21.71a	2.53a	134a
Fertilization level (F)	*	*	*	ns
F ₁	1673c	16.14b	2.16b	168a
F ₂	2464b	23.08a	2.72a	170a
F ₃	2656a	25.14a	2.76a	137a
WQ × F	ns	ns	ns	ns
180–206 DAT				
Water quality (WQ)	ns	*	ns	ns
WQm	4185a	40.58b	5.20a	148a
WQh	4273a	43.13a	5.13a	183a
Fertilization level (F)	*	*	*	ns
F ₁	3312c	32.98c	4.20b	190a
F ₂	4452b	43.92b	5.44a	146a
F ₃	4923a	48.66a	5.86a	160a
WQ × F	ns	ns	ns	ns

ns, *: nonsignificant or significant at $P = 0.05$. Values in the same column followed by different small letters indicate significant differences between treatments.

^aDays after transplanting.

increase in the number of fruits per truss at 127 DAT (10%) and in the DMC percentage at 127 and 179 DAT, being 9 and 6.8% respectively (Table 3).

A 1.6 dS m⁻¹ increase in the irrigation water EC (0.6 to 2.2 dS m⁻¹) produced an average increase of 0.5 DMC% (Table 3), a result that agrees with Li, Stanghellini, and Challa (2001) and Magán (2005) and that established a correlation between DMC and EC, with an average increase of 0.30 of dry-matter percentage for a one-unit increment of EC. The

Salinity and Fertilization Effects on Tomato

491

Table 3. Average weight per fruit, number of fruits per truss and dry-matter content of fruit (DMC)

Parameter	DAT ^a			Signification ^b
	0–127	128–179	180–206	
<i>Average weight per fruit (g)</i>				
Water quality (WQ)	ns	*	ns	
WQm	124.92a A	109.28a B	95.60a C	*
WQh	123.06a A	102.17b B	92.10a C	*
Fertilization level (F)	*	ns	ns	
F ₁	127.20b A	103.93a B	94.16a C	*
F ₂	126.25b A	107.07a B	92.44a C	*
F ₃	118.51a A	106.16a B	94.94a C	*
WQ × F	ns	ns	ns	
<i>Number of fruit per truss</i>				
Water quality (WQ)	*	ns	ns	
WQm	8.51b A	8.31a A	6.70a B	*
WQh	9.36a A	8.62a A	7.24a B	*
Fertilization level (F)	ns	ns	ns	
F ₁	8.44a A	7.64a A	7.13a A	ns
F ₂	8.89a A	8.58a A	6.79a B	*
F ₃	9.47a A	9.18a A	7.00a B	*
WQ × F	ns	ns	ns	
<i>DMC (%)</i>				
Water quality (WQ)	*	*	ns	
WQm	5.91b B	6.80b A	7.01a A	*
WQh	6.45a C	7.26a B	7.82a A	*
Fertilization level (F)	ns	ns	ns	
F ₁	6.22a B	7.10a A	7.56a A	*
F ₂	6.23a B	6.89a A	7.08a A	*
F ₃	6.10a B	7.10a AB	7.61a A	*
WQ × F	ns	ns	ns	

ns, *: nonsignificant or significant at $P = 0.05$. Values in the same column followed by different small letters indicate significant differences between treatments. Values in the same line followed by different capital letters indicate significant differences between dates.

^aDays after transplanting.

^bIn this column significant differences between harvesting periods are shown.

DMC values obtained are within the normality range (5.0 to 7.5) proposed by Davies and Hobson (1981). DMC (%) was increased through all growing crop cycles for all treatments. However, number of fruits per truss was not affected by the salinity of the water in the second and third growing steps (Table 3). This value only increased ($P < 0.05$ significance) with high salinity in the first growing stage (0–127 days).

The fertilization level had an important and significant effect on marketable production, increasing the yields, fruit number, and number of trusses (Table 2) during all stages with increasing values for higher concentrations and with no effect on unmarketable yield (Table 2). The fertilization level caused a reduction in the average fruit weight at first harvest (127 days), specifically with F_3 treatment (Table 3). The fertilization level did not affect the DMC (%) nor the number of fruits per truss (Table 3). Yields obtained with F_2 and F_3 fertilization levels were higher than the standard yields of the production area (8.7 kg m^{-2}) (Consejería de Agricultura y Pesca 2004). Treatment F_1 produced a yield 28% lower than F_2 , whereas F_3 was 10% higher than F_2 .

In the production parameters studied, there was no interaction between the quality of irrigation water and the level of fertilization.

The average fruit weight and number of fruits per truss went down and DMC% increased through time, independent of the fertilization level and water quality employed (Table 3).

Quality Parameters

Water qualities affect organoleptic fruit parameters except juice pH (Table 4). High-salinity irrigation water reduced the firmness of the fruit at 127 and 179 DAT, by 9% and 22% respectively (Table 4). The high-salinity water increased the soluble solids ($^{\circ}\text{Brix}$) for all the dates analyzed. Total soluble solid concentrations obtained were slightly higher than those found by Magán (2005) for similar salinity conditions, probably due to the varieties studied in each case. Like Ho (1996) and Magán (2005), we also found that the fruit total soluble solids concentration was positively correlated with the fruit dry-matter percentage.

The fruit's titratable acidity increases with high-salinity water, with significant differences at 127 and 206 DAT. The same tendencies are observable at 179 DAT but without significant differences. Treatments do not present differences between periods for the titratable acidity. The titratable acidity values obtained with the high-salinity treatments, 50 meq L^{-1} , are slightly lower than those found by Magán (2005), 59 meq L^{-1} , for similar concentrations of chloride (Cl^{-}) and sodium (Na^{+}), probably due to a different cropping system (soilless culture). The use of hydroponic systems increases the values of some fruit quality parameters such as titratable acidity, compared to soil-based systems (as in the current experiment) (Benoit and Ceustermans 1987). The pH of tomato fruit was not affected by water salinity (Table 4), achieving values near to 4.3, comparable to values obtained by Ben-Oliel et al. (2004).

Salinity and Fertilization Effects on Tomato

493

Table 4. Firmness (Kg), total soluble solids (°Brix), juice pH, and tritable acidity (meq citric acid/L juice) in marketable fruit

Parameter	DAT ^a			Signification ^b
	0–127	128–179	180–206	
<i>Firmness (kg)</i>				
Water quality (WQ)	*	*	ns	
WQm	3.67a B	4.51a A	4.55a A	*
WQh	3.33b B	3.52b B	4.3a A	*
Fertilization level (F)	*	ns	*	
F ₁	3.03b B	4.06a A	3.8b A	*
F ₂	3.79a C	4.17a B	4.62a A	*
F ₃	3.66a B	3.83a B	4.86a A	*
WQ × F	*	ns	*	
<i>Total soluble solids (°Brix)</i>				
Water quality (WQ)	*	*	*	
WQm	4.29b B	5.20b A	5.13a A	*
WQh	4.99a B	5.74a A	5.88b A	*
Fertilization level (F)	ns	ns	ns	
F ₁	4.69a B	5.65a A	5.50a A	*
F ₂	4.50a B	5.21a A	5.44a A	*
F ₃	4.74a B	5.55a A	5.58a A	*
WQ × F	*	ns	*	
<i>Juice pH</i>				
Water quality (WQ)	ns	ns	ns	
WQm	4.32a A	4.35a A	4.39a A	ns
WQh	4.29a A	4.33a A	4.34a A	ns
Fertilization level (F)	ns	ns	ns	
F ₁	4.31a A	4.31a A	4.38a A	ns
F ₂	4.30a A	4.32a A	4.39a A	ns
F ₃	4.31a A	4.39a A	4.33a A	ns
WQ × F	ns	ns	ns	
<i>Tritable acidity (meq citric acid/L juice)</i>				
Water quality (WQ)	*	ns	*	
WQm	42.28b A	44.89a A	40.93b A	ns
WQh	49.57a A	49.18a A	50.11a A	ns
Fertilization level (F)	*	ns	*	
F ₁	43.52b A	45.28a A	40.82b A	ns
F ₂	46.84a A	46.64a A	43.36b A	ns
F ₃	47.42a A	49.18a A	52.38a A	ns
WQ × F	ns	ns	ns	

ns, *: nonsignificant or significant at P = 0.05. Values in the same column followed by different small letters indicate significant differences between treatments. Values in the same line followed by different capital letters indicate significant differences between dates.

^aDays after transplanting.

^bIn this column significant differences between harvesting periods are shown.

The fertilization level did not affect the soluble solids ($^{\circ}$ Brix) and tomato juice pH (Table 4), but it did affect the firmness and titratable acidity at first and third harvest (127 and 206 DAT), increasing it during the F_2 and F_3 treatments (Table 4). The positive effect on fruit acidity seems to be related to N and K rather than P. Davies and Winsor (1967) and Thakur, Singh, and Nelson (1996) reported a positive relationship between N and K concentration and fruit acidity. Mahakum, Beeper, and Burns (1979) found a negative correlation between P concentration and titratable fruit acidity.

Along with the rise of DMC% (Table 3), the firmness and total soluble solids ($^{\circ}$ Brix) increased throughout time, independent of the fertilization level and water quality employed (Table 4).

There was an interaction between the quality of water and the fertilization level on the firmness and the soluble solids concentration of the fruit at 127 and 206 DAT (Table 4). The $WQ \times F$ interactions are represented in Figures 1 and 2. The fertilization treatments using WQh water did not significantly affect the firmness of the tomato fruit harvested at 127 and 206 DAT (Figures 1a and 1b). The fertilization treatments using WQm water affected the firmness of the fruit, increasing it as the concentration increased (Figures 1a and 1b). The $WQ \times F$ interaction registered at 127 DAT on the total soluble solids (Figure 2a) shows a reduction of this parameter in treatment F_2 with WQm water. At 206 DAT (Figure 2b), the fertilization treatments using WQh increase the soluble solids concentration of the fruit along with the F_3 fertilization level, there being no significant differences among fertilization treatments using WQm water.

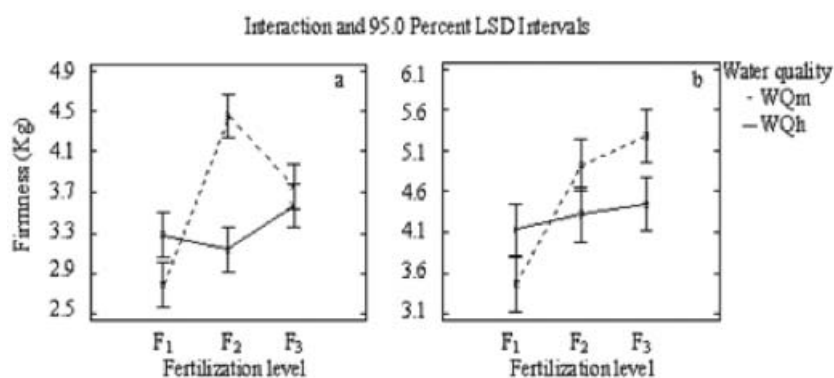


Figure 1. Interaction ($WQ \times F$) firmness (Kg) to 127 DAT (a) and 206 DAT (b).

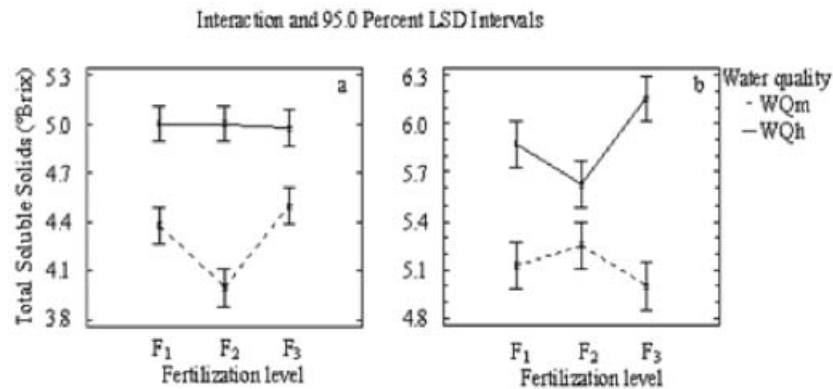


Figure 2. Interaction (WQ \times F) total soluble solids ($^{\circ}$ Brix) to 127 DAT (a) and 206 DAT (b).

CONCLUSIONS

Irrigation water EC, 2.2 dS m^{-1} , is adequate for high yield and quality of tomato in the commercial cycle. The data suggest that the application of F1 would not allow a high production level to be obtained. F2 is more efficient because it enables the maintenance of high yield and fruit quality throughout the commercial period, with a lower level of NPK (50%) fertilization than treatment F3.

ACKNOWLEDGMENTS

This work is part of the Project “Optimization of Fertigation of Greenhouse Vegetable Crops,” supported by Alboran Agrícola S.A., Yara España S.A, and IFAPA (Consejería de Innovación Ciencia y Empresa, Junta de Andalucía).

REFERENCES

- Adams, P., and L. C. Ho. 1989. Effects of constant fluctuating salinity on the yield, quality, and calcium status of tomatoes. *Journal of Horticultural Science* 64:725–732.
- AOAC. 1990. *Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists*, 15th ed. AOAC. Arlington, VA, USA.
- Baker, A. S. 1969. Colorimetric determination of nitrate in soil and plant extracts with brucine. *Journal of Agriculture and Food Chemistry* 17:802.
- Bar-Yosef, B. 1986. Fertigation, a technique to optimize crop yield with special reference to vegetables. *Proceedings of the Third International Conference of Irrigation*, The Irrigation Association eD. 87–97. Tel-Aviv.

- Benoit, F., and N. Ceustermans. 1987. Some qualitative aspects of tomatoes grown on NFT. *Soiless Culture* 3:3–7.
- Black, C. A. 1965. *Methods of soils analysis, Part II: Chemical and microbiological properties*.
- Bock, B. R., and G. W. Hergert. 1991. Fertilizer nitrogen managements. In *Managing Nitrogen for Groundwater Quality and Farm Profitability*, ed. R. F. Follet, D. R. Keeney, and R. M. Cruse, 139–164. Madison, Wisc.: Soil Science Society of America.
- Castilla, N. 1986. *Contribución al estudio de los cultivos enarenados en Almería: Necesidades hídricas y extracción de nutrientes del cultivo de tomates de crecimiento indeterminado en abrigo de polietileno*. PhD diss., Universidad Politécnica de Madrid.
- Chaney, K. 1990. Effect of nitrogen fertilizer rate on soil nitrogen content after harvesting winter wheat. *Journal of Agricultural Science* 114:171–176.
- Chapagain, B. P., and Z. Wiesman. 2004. Effect of potassium magnesium chloride in the fertigation solution as partial source of potassium on growth, yield, and quality of greenhouse tomato. *Scientia Horticulturae* 99:279–288.
- Consejería de Agricultura y Pesca. 2004. Memoria resumen provincia de Almería año 2004. *Delegación Provincial de Almería, Consejería de Agricultura y Pesca*, Junta de Andalucía. Available at <http://www.cap.junta-andalucia.es>
- Davies, J. N., and G. E. Hobson. 1981. The constituents of tomato fruit—The influence of environment, nutrition, and genotype. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 15:205–280.
- Davies, J. N., and G. W. Winsor. 1967. Effect of nitrogen, phosphorus, potassium, magnesium and liming on the composition of tomato fruit. *Journal of the Science of Food and Agricultural* 18:459–466.
- Dorais, M., and A. P. Papadopoulos. 2000. Greenhouse tomato fruit quality. *Horticultural Reviews* 29:239–319.
- Dorais, M., A. P. Papadopoulos, and A. Gosselin. 2001. Influence of electric conductivity management in greenhouse tomato yield and fruit quality. *Agronomy* 21:367–383.
- Gioacchini, P., A. Natri, C. Giovannini, C. Marzadori, L. Vittori Antisari, and C. Gessa. 2002. Influence of urease and nitrification inhibitors on N losses from soils fertilized with urea. *Biology and Fertility of Soils* 36:129–135.
- Gough, C., and G. E. Hobson. 1990. A comparison of the productivity, quality, and shelf life characteristics and consumer reaction to the crop from cherry tomato plant grown at different levels of salinity. *Journal of Horticultural Science* 65:431–439.
- Grattan, S. R., and C. M. Grieve. 1999. Salinity–mineral nutrient relations in horticultural crops. *Scientia Horticulturae* 78:127–157.
- Ho, L. C. 1996. The mechanism of assimilate partitioning and carbohydrate compartmentation in fruit in relation to the quality and yield of tomato. *Journal of Experimental Botany* 47:1239–1243.
- Karlberg, L., J. Rockström, J. G. Annandale, and J. M. Steyn. 2007. Low-cost drip irrigation—A suitable technology for southern Africa: An example with tomatoes using saline irrigation water. *Agricultural Water Management* 89 (1–2): 59–70.

- Koroleff, F. 1970. Direct determination of ammonia in natural waters as indophenol blue (revised). In *Information on techniques and methods for seawater analysis* (Interlab Report 3), Int. Counc. Explor. Sea Comm. Meet. C9_3: 19–22. Ashland.
- Li, Y. L., C. Stanghellini, and H. Challa. 2001. Effect of electrical conductivity and transpiration on vegetative growth of tomato. *Scientia Horticulturae* 89:9–21.
- MAPA. 1994. *Métodos Oficiales de Análisis*, Tomo III. Madrid: Secretaria General Técnica.
- Magán, J. J. 2005. *Respuesta a la salinidad del tomate larga vida en cultivo sin suelo recirculante en el sureste español*. PhD diss., Universidad de Almería.
- Mahakum, N., P. W. Beeper, and E. E. Burns. 1979. Acidic constituents of various tomato fruit types. *Journal of Food Science* 44:1241–1244.
- Marschner, H. 1995. *Mineral nutrition of higher plants*, 2nd ed. London: Academic Press.
- Mengel, K., and E. A. Kirkby. 2001. *Principles of plant nutrition*, 5th ed. Switzerland: International Potash Institute.
- Nuez, F., G. Llacer, and J. J. Ruiz. 2002. Horticulture in Spain. *Chronica Horticulturae* 42:25–29.
- Olsen, S. R., C. V. Cole, F. S. Watanabe, and L. A. Dean. 1954. *Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate* (U.S. Dep. of Agric. Circ. 939). Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office.
- Pratt, P. F. 1984. Nitrogen use and nitrate leaching in irrigated agriculture. In *Nitrogen in crop production*, ed. R. D. Hauck, 319–333. Madison, Wisc.: American Society of Agronomy.
- Ramos, C. 1996. Effects of agriculture on the nitrogen losses to the environment. *Fertilizer Research* 43:183–189.
- Thakur, B. R., R. K. Singh, and P. E. Nelson. 1996. Quality attributes of processed tomato products: A review. *Food Reviews International* 12:375–401.
- Thomas, G. W. 1982. Exchangeable cations. In *Methods of soil analysis, Part 2*, ed. A. L. Page, R. H. Miller, and D. R. Keeney, 159–165. Madison, Wisc.: ASA and SSSA.

CAPÍTULO VI

Influence of Salinity and Fertilization Level on the Nutrient
Distribution in Tomato Plants under a Polyethylene
Greenhouse in the Mediterranean Area



Communications in Soil Science and Plant Analysis, 40: 498–513, 2009

Copyright © Taylor & Francis Group, LLC

ISSN 0010-3624 print/1532-2416 online

DOI: 10.1080/00103620802695073

Influence of Salinity and Fertilization Level on the Nutrient Distribution in Tomato Plants under a Polyethylene Greenhouse in the Mediterranean Area

María Luz Segura Pérez,¹ Juana Isabel Contreras París,¹ Roberto Salinas Yasuda,² and María Teresa Lao²

¹Institute of Agricultural and Fishing Investigation and Training (IFAPA), Junta of Andalusia, Almería, Spain

²Department of Vegetal Production, Higher Polytechnic School, University of Almería, Almería, Spain

Abstract: The experiment was conducted in a polyethylene greenhouse with the 'Pitenza' variety of tomato crop on a sand-mulched sandy loam soil using trickle irrigation. The experimental design was two-factorial with four randomized blocks. The treatments applied were the result of a combination of two irrigation water qualities (C₂S₁ and C₃S₂) and three fertilization levels: F₁, half of the recommended rate; F₂, the recommended rate [i.e., 7.1 mmol L⁻¹ of nitrate (NO₃⁻)–nitrogen (N), 0.5 mmol L⁻¹ of phosphoric acid (H₂PO₄⁻)–phosphorus (P) and 3.1 mmol L⁻¹ of potassium (K⁺)], and F₃, double the recommended rate. Total content of nutrients [N, P, K, calcium (Ca), magnesium (Mg)] and sodium (Na) were determined for different plant parts (pinch rest, harvested fruit, developing fruit, leaf, and stem) for the whole season. Also, the relative sink strengths between fruit and vegetative plant parts were calculated. The main mineral constituent of the tomato plant was K, surpassing the N content, and the minor constituent was P. With the same level of fertilization, the influence of salinity was significant at F₁ (half of the recommended rate) and F₂ (the recommended rate) but not at the highest level. Plant nutrient distribution showed the same behavior for N, P, and K, the fruit being the nutrient sink. On the other hand, the same tendency was observed for Ca and Mg, stored mainly in

Address correspondence to María Luz Segura Pérez, IFAPA Centro La Mojonera, Consejería de Innovación Ciencia y Empresa, Junta de Andalucía, Camino San Nicolás, no. 1, La Mojonera, Almería, Spain. E-mail: marial.segura.ext@juntadeandalucia.es

the leaf. Nevertheless, Na presented low levels in young tissues, whereas the levels were higher and similar in fruit, leaf, and stem.

Keywords: Fertigation, NPK rates, NPK uptake, sand-mulch, water salinity

INTRODUCTION

Tomato is frequently cultivated in Mediterranean greenhouses. In Almería, Spain, tomato is one of the most important greenhouse vegetable crops and is grown on 8,700 ha. The most common cropping techniques are sand-mulched soil, fertigation, and the use of irrigation groundwater with high electrical conductivity (EC; 2.0 and 4.5 dSm⁻¹), chloride (Cl⁻; 500 and 1000 mg L⁻¹), and sodium (Na⁺; 250–700 mg L⁻¹) as a result of seawater intrusion. These waters are conventionally classified as having moderate to severe restrictions for the irrigation of crops (Ayers and Westcot 1987).

Although tomato is classified as moderately sensitive to salinity (Ayers and Westcot 1987), stress by salinity exposure (sodium chloride, NaCl) has an influence on the nutrient-transport process, which can produce a nutritional disorder and ionic imbalance in plant tissues (Läuchli and Epstein 1970). Saline stress may result in a reduction in nitrogen (N), phosphorus (P), potassium (K), and calcium (Ca) uptake (Magán et al. 2005; Martínez, Berstein, and Läuchli 1996; Lynch and Läuchli 1985), affecting plant growth and development. Most tomato studies have shown that increasing the EC of the nutritional solution improves fruit quality (Contreras et al. 2007; Chapagain and Wiesman 2004).

Sodium is the major cation in saline water even though it is not considered essential for tomato growth (Brownell and Crossland 1972). In addition, high Na concentration produces interferences on K uptake (Lazof and Cheeseman 1988). Salinity tolerance in some plant species has been related to higher K and lower Na uptake (Hajibagheti et al. 1989), as a capacity to exclude Na from the leaves and to maintain higher K/Na ratio in plant tissues (Al-Karaki 2000). Therefore, improved K nutrition may compensate for saline conditions (Al-Karaki 2000).

Because adequate nutrient level in the medium can reduce saline effects, and, therefore efficient use of the fertigation technique, good knowledge concerning plant nutrient uptake can be of help in improving conditions for high yields (Bar-Yosef 1986). Lower nutrient concentrations may reduce plant production, and higher concentrations may produce nutrient imbalances due to unfavorable nutrient interactions (Grattan and Grieve 1999). Thus, yields may be depressed in tomato crops. Concentrations of nitrate (NO₃⁻)-N in a nutritive solution less

than 4 mM may reduce the dry weight of the aerial part of the plant, reducing the extraction of nutrients that the crop is able to carry out (Fontes and Ronchi 2002). For the cultivation of tomato, Maruo, Takagaki, and Shinohara (2004) noted the critical concentrations of NO_3^- -N, phosphate (PO_4^{3-})-P, and K^+ in solution as 2.5, 1.0, and 2.0 mM respectively. For similar concentrations (3.6, 1.3, and 1.6 mM), Segura, Contreras, and Galindo (2007) observed a reduction of the bioproductivity of the plant. However, effects of NPK fertilization on uptake and nutrient distribution in tomato plant grown on sand-mulched soil and Mediterranean climate conditions are still relatively poorly documented.

The aim of this study was to evaluate the influence of two irrigation water qualities and three different levels of NPK supply, applied by fertigation, on uptake and nutrient distribution in tomato plants.

MATERIALS AND METHODS

Plant Culture and Treatments

The study was conducted at the Instituto de Investigación y Formación Agraria (IFAPA), La Mojonera, Almería, Spain (longitude $2^\circ 41' \text{ W}$, latitude $36^\circ 47' \text{ N}$, elevation 160 m) between September and April 2003/2004. Tomato plants (var. 'Pitenza') were grown in polyethylene greenhouse (1700 m^2). The daily average temperatures during the experiment were as follows: maximum temperature, 30°C ; middle temperature, 17°C ; and minimum temperature, 11°C .

Experimental design was two-factorial with four randomized blocks, six treatments resulting from the combination of two irrigation water qualities QWm (C_2S_1) and QWh (C_3S_2), and three fertilization levels: F_1 (half of the recommended rate), F_2 (the recommended rate), and F_3 (double the recommended rate) of nutrients. The nutrients were applied by means of fertigation with a trickle-feed irrigation system with a capacity of 3 L h^{-1} , independent for each of the treatments. The compositions of irrigation water and nutrient solutions are specified in Table 1. The recommended rate (F_2) represented the following average nutrient concentrations: 7.1 mM of NO_3^- -N, 0.5 mM of PO_4H_2^- -P, and 3.1 mM of K^+ , corresponding to 36.7 g m^{-2} of N, 5.4 g m^{-2} of P, and 44.8 g m^{-2} of K under local conditions (Castilla 1986).

Hydroterra fertilizers (Yara Internacional ASA) were applied. The formulations used were (1) Zafiro: 10% N (9.4% NO_3^- -N and 0.6% NH_4^- -N)-7% K_2O -13.5% CaO ; (2) Rubí: 10% K_2O -2% NO_3^- -N; (3) Jade Plus: 20% P_2O_5 -8% K_2O .

The pH was similar in all treatments, and similar irrigation water was used.

Table 1. Irrigation water and nutrient solution characteristics (QWm, medium salinity water; QWh, high salinity water)

Water	EC (dSm ⁻¹)	Cl ⁻ (mM)	SO ₄ ²⁻ (mM)	NO ₃ ⁻ (mM)	H ₂ PO ₄ ⁻ (mM)	Na ⁺ (mM)	Mg ²⁺ (mM)	Ca ²⁺ (mM)	K ⁺ (mM)	SAR ^a	USDA classification
QWm	0.6	2.1	0.6	0.6	0.0	1.5	1.7	1.2	0.1	0.9	C ₂ S ₁
QWh	2.2	15.5	1.3	2.5	0.0	12.3	4.2	2.0	0.2	4.9	C ₃ S ₂
WQm F ₁	1.1	2.1	0.6	3.6	0.3	1.5	1.7	2.1	1.6	0.8	
WQm F ₂	1.4	2.1	0.6	7.1	0.5	1.5	1.7	2.8	3.1	0.7	
WQm F ₃	2.1	2.1	0.6	14.2	1.0	1.5	1.7	3.7	6.2	0.6	
WQh F ₁	2.6	15.5	1.3	3.6	0.3	12.3	4.2	2.1	1.6	4.9	
WQh F ₂	3.0	15.5	1.3	7.1	0.5	12.3	4.2	2.8	3.1	4.7	
WQh F ₃	3.7	15.5	1.3	14.2	1.0	12.3	4.2	3.7	6.2	4.4	

^aSodium adsorption ratio.

Seedlings were planted in sand-mulched sandy loam soil on 10 September with a plant density of 1.6 plants m⁻² and a growing cycle of 224 days. Each plot contained 32 plants.

The nutrient solution varied widely within the season crop for variation in plant development and water supply. Irrigation with nutrient solution was started the first day of planting, and the crop was irrigated daily up to the end of experiment (22 April 2005). The daily dose was modified each week according to plant size, ranging from 0.66 to 2.85 L m⁻² with an average of 1.65 L m⁻² over the entire growth period. The amount to be applied was predetermined to avoid moisture tension of more than 10–15 KP as measured using a tensiometer at a depth of 15 cm and distance of 10 cm from the dripper.

During plant development, all lateral shoots were removed manually, and the resulting single stem was trained up a string using the high-wire system. Weekly ripe fruit harvests started at 20 weeks after planting and continued for 89 days.

The soil characteristics were alkaline pH (8.54), organic matter contents of 1.97%, available potassium of 168 mg Kg⁻¹ (low), high mineral nitrogen [NO₃⁻-N plus ammonium (NH₄⁺)-N] of 60 mg Kg⁻¹, and available phosphorous of 86 mg kg⁻¹. Soil pH was determined with a glass electrode in saturated paste extract (MAPA 1994). Soil organic matter was determined using the Walkley–Black method (Black 1965). Soil available K was determined by extraction with ammonium acetate according to the Thomas method (1982) by atomic absorption spectrometry (Unican 969 AA spectrometer, Thermo Fisher Scientific, Waltham, Mass.). Nitrate was determined by means of colored complexes with brucine acid (Baker 1969), and ammonium was based on the formation of blue-colored complexes of indophenol (Koroleff 1970). Soil-available P was determined by extraction with sodium bicarbonate (Olsen et al. 1954).

Preparation and Plant Analyses

Whole plants, excluding the roots, were harvested to the end of experiment (224 days). Two plants per plot (10 plants per treatment total) were randomly selected for destructive sampling and separated into different plant fractions: developing fruits, leaves and stem. Lateral shoots (pinch rest) were collected from two plants per plot (eight plants per treatment total). Harvested fruits (fruit) were randomly selected every harvesting, collecting 10 fruits per plot (40 fruits per treatment total).

Fresh samples for the different plant parts were dried at 70 °C to constant weight, and the total mineral content was determined in dry-matter samples. Nitrogen was determined by the micro-Kjeldahl

procedure, P was determined by the phosphovanadomolybdate method (AOAC 1995), and K, Ca, Mg, and Na were determined by atomic absorption spectrometry (Unican 969 AA spectrometer, Thermo Fisher Scientific, Waltham, Mass.).

Data Analysis

Data were analyzed using analysis of variance (ANOVA) for a 2×3 factorial design in four complete randomized blocks. A multifactor ANOVA was also performed to identify the significant factors (irrigation water quality and fertilization level) and interactions between the factors. Date percentage was transformed with inverse sign $\sqrt{}$ to obtain a normal distribution.

Data of nutrient distribution in plant organs were also analyzed as a completely random design and were made by one-way ANOVA with five treatments (pinch rest, fruit, leaf, stem, and developing fruit) and 24 replications. For each analysis, when ANOVA was significant, statistically significant differences between means were identified using Duncan's test ($p < 0.05$). Statistical analyses were performed with Statgraphics Plus 4.1 (Statgraphics, Warrenton, Va.).

RESULTS AND DISCUSSION

Nutrient and Sodium Total Uptake by Crop

Treatments studied showed significant differences in amounts of nutrients taken up by aerial plant parts. Treatments WQmF₃ and WQhF₃ presented the highest uptake of N, P, and K, independent of the water quality (Table 2), related to a greater production of plant dry material (Segura, Contreras, and Galindo 2007). On the other hand, the lowest nutrient uptake level (Table 2) could be observed with the WQmF₁ treatment.

The fertilization level altered nutrient concentration, increasing N, P, K, Ca, Mg, and Na uptake with the increase in NPK concentration (Table 2). Kirkby and Knight (1977) detected an increase in N uptake when N levels were augmented in the medium. Al-Karaki (2000) obtained a K increment uptake when K concentration in soil solution was increased. Mohammad et al. (1998) observed an increase in P uptake when P in soil solution increased from 0.5 to 1 mM, which agrees with our results.

Water quality (WQm, WQh) affected N, K, Mg, and Na exports but did not alter P and Ca uptake (Table 2). Also, Mg and Na export levels

Table 2. Nutrient and sodium total uptake by plant

Parameter	N (g ⁻²)	P (g ⁻²)	K (g ⁻²)	Ca (g ⁻²)	Mg (g ⁻²)	Na (g ⁻²)
Treatment	*	*	*	*	*	*
WQm F ₁	18.95d	4.22d	29.34e	11.93d	3.96d	1.69e
WQm F ₂	25.05c	5.75c	40.56c	21.28c	6.40c	2.59de
WQm F ₃	38.88a	7.51a	54.22a	35.57a	10.94b	3.63d
WQh F ₁	22.69c	4.46d	36.60d	20.03c	10.88b	6.81c
WQh F ₂	34.16b	6.63b	45.86b	28.84b	14.05a	9.09b
WQh F ₃	41.26a	7.67a	54.06a	29.07b	13.87a	13.45a
Water quality (WQ)	*	ns	*	ns	*	*
WQm	27.63b	5.83a	41.37b	22.92a	7.10b	2.64b
WQh	32.70a	6.25a	45.51a	25.98a	12.93a	9.79a
Fertilization level (FL)	*	*	*	*	*	*
F ₁	20.82c	4.34c	32.97c	15.98c	7.42c	4.25c
F ₂	29.60b	6.19b	43.21b	25.06b	10.22b	5.84b
F ₃	40.07a	7.59a	54.14a	32.32a	12.41a	8.54a
WQ × FL	ns	ns	ns	*	*	*

Notes. ns: nonsignificant.

*Significant by analysis of variance (ANOVA) at $p \leq 0.05$.

Means with different letters in the same column indicate significant differences between treatments using Duncan's test at $p \leq 0.05$.

increased with saline water treatments due to a major presence of these elements in the water (WQh, Table 1). These results agree with other studies in the Mediterranean area (Malorgio et al. 2001). Increased uptake of N and K observed with WQh agrees with the results of Stanghellini et al. (2003), although salinity levels did not affect tomato growth because a decrease in K uptake due to the K^+/Na^+ ratio was present in the nutrient solution (Al-Karaki 2000). A decrease in N uptake was not observed either due to the NO_3^-/Cl^- ratio present in the nutrient solution (Magán et al. 2005). Phosphorus (P) concentration in aerial plant part was not affected by water salinity levels, in accordance with the results of Mohammad et al. (1998) for tomato crop, who did not find alterations in P uptake up to 50 mM of NaCl in saline water. Phosphorus uptake was modified by fertilization level, and every major level of nutrient increased P export (Table 2), in concordance with Jungk et al. (1990), who indicated that P concentrations in the plants increased with an increase in external P concentrations, because P has low mobility in the soil (Salinas, Lao, and Romero 2006), and it is important that phosphate be available at the membrane surface for its uptake.

No interaction was found between water salinity and fertilization level on the N, P, and K uptake of plants. On the other hand, an

interaction between water salinity and fertilization level could be observed with regard to Ca, Mg, and Na uptake. Treatment with major Ca uptake was WQmF₃; meanwhile WQF₂ and WQhF₃ presented the amounts of Mg taken up, and WQhF₃ had the highest values for Na (Table 2).

Nutrients and Sodium Distribution by Plant

Figures 1–6 show the percent distribution of N, P, K, Ca, Mg, and Na in each organ of the plant. Considering productive efficiency (PE) as the percentage of fruit nutrient uptake compared to the total plant uptake, all treatments showed a high PE of NPK, with the fruit as a principal nutrient sink in all the cases: 43–59% of N, 34–50% of P, and 51–63% of K, according to the treatments (Figures 1, 2, and 3). Fisher, Johnstone, and Nichols (2002) found in nutrient film solution (NFT) that fruit was

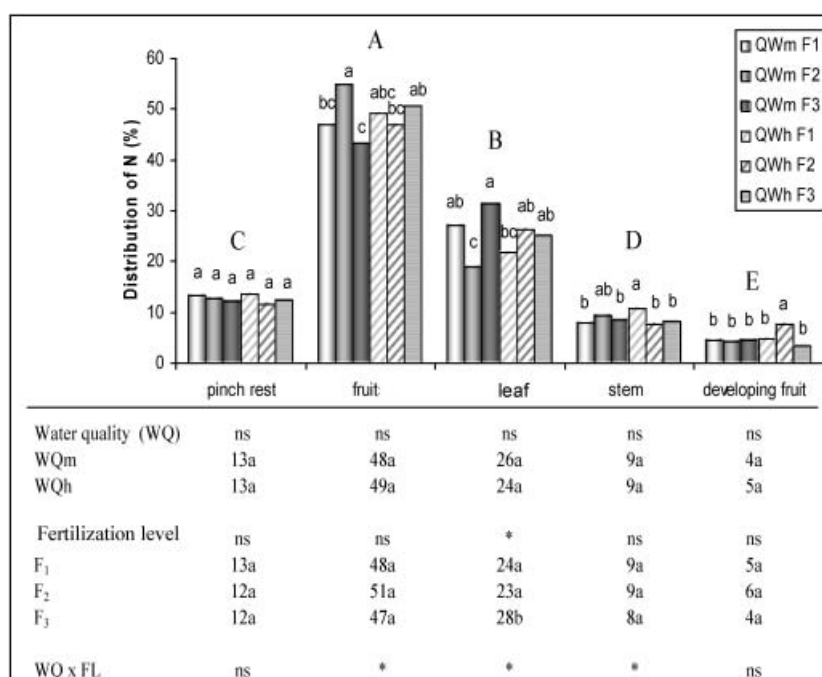


Figure 1. Nitrogen distribution in different plant organs: ns: nonsignificant; *, significant by analysis of variance (ANOVA) at $p \leq 0.05$. Means with different small letters indicate significant differences between treatments, and means with different capital letters indicate significant differences between plant organs using Duncan's test at $p \leq 0.05$.

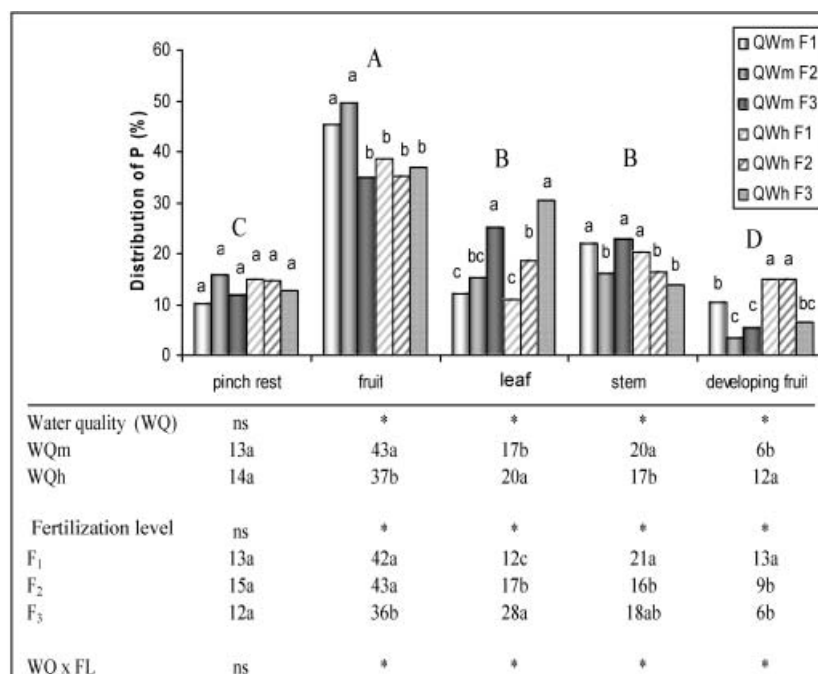


Figure 2. Phosphorous distribution in different plant organs: ns: nonsignificant; *, significant by analysis of variance (ANOVA) at $p \leq 0.05$. Means with different small letters indicate significant differences between treatments, and means with different capital letters indicate significant differences between plant organs using Duncan's test at $p \leq 0.05$.

the main nutrient sink for N and K, showing a similar PE as this assay. Castilla (1986) showed that the main P sink was the tomato fruit.

The distribution of N in plant was unaffected by water quality and fertilizer level, but the interaction between water quality and fertilization level was significant ($p < 0.05$) (Figure 1). The WQmF₂ treatment showed higher N exported by the fruit than WQmF₁ and F₃, related to a lower N exported by the leaf, as a consequence of the greater productive efficiency that this treatment presents, and this is also reflected by the high quantity of developing fruits.

Water quality and fertilization level had a significant effect on distribution of P in the plant (Figure 2). The increase of water salinity reduced P uptake by fruit and stem but increased it in leaf. A similar effect was observed when raising the fertilization level. The interaction between water quality and the fertilization level was significant ($p < 0.05$) on P uptake by different plant parts. Phosphorus distribution in leaf increased in each fertilizer treatment, regardless of the salinity level

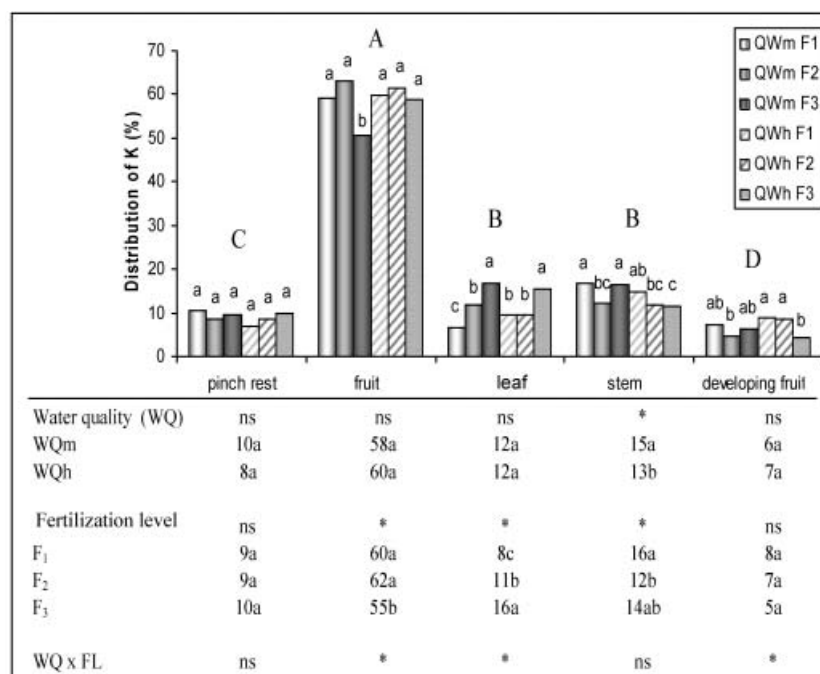


Figure 3. Potassium distribution in different plant organs: ns: nonsignificant; *, significant by analysis of variance (ANOVA) at $p \leq 0.05$. Means with different small letters indicate significant differences between treatments, and means with different capital letters indicate significant differences between plant organs using Duncan's test at $p \leq 0.05$.

(Figure 2); in fruit it behaved differently. However, low salinity level treatments and high fertilization rate (WQmF₃) reduced P contents in fruit, showing a retranslocation at leaves specifically in this treatment (WQmF₂) and demonstrating the high mobility of P inside the plant and specific allocation in vacuoles (leaves) when levels present an adequate amount in the fruit. This P behavior is in accordance with the changes in metabolism that allow remobilization of P in the plant as shown by Raghothama and Karthikeyan (2005) and Zrenner et al. (2006).

Water quality had a significant effect on K uptake by stem (Figure 3), reducing the level by an increase in water salinity. No effect was observed in other plant parts. The fertilization level had a significant effect on K uptake by fruit, leaf, and stem. When the fertilization level was raised, the productive efficiency that this method produces (Figure 3) was lower because of its greater vegetative development effect (data not shown), which was also observed in the cultivation of beans when increasing the concentration of K in the fertigation solution (Segura et al. 2006). Water quality significantly interacted with fertilization level in its effect on K

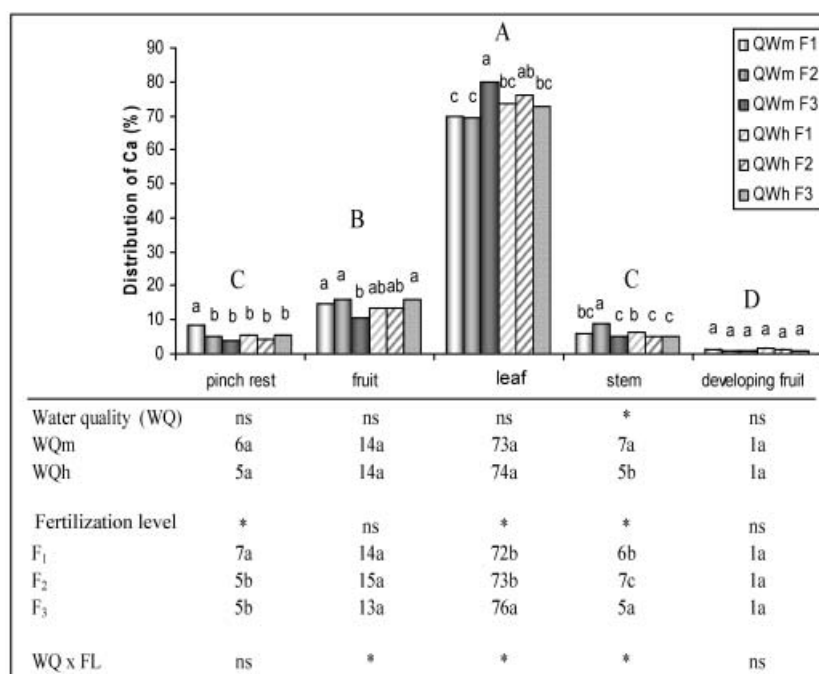


Figure 4. Calcium distribution in different plant organs: ns: nonsignificant; *, significant by analysis of variance (ANOVA) at $p \leq 0.05$. Means with different small letters indicate significant differences between treatments, and means with different capital letters indicate significant differences between plant organs using Duncan's test at $p \leq 0.05$.

uptake by fruit, leaf, or developing fruit. The K uptake in tomato fruit was lower in WQmF₃ and higher in leaf than F₁ or F₂ concentrations. In tomato irrigated with high-salinity water, K uptake by leaf was higher at the high fertilization level compared to other treatments F₁ or F₂, because less K was exported by developing fruit.

Calcium uptake by the fruit was 10–16%, with no differences between treatments (Figure 4), and Mg uptake level by the fruit was 10–20%. Treatments WQmF₁ and WQmF₂ showed the highest uptake levels (Figure 5). Leaf was the major Ca and Mg sink for all the treatments with 69–80% for Ca and 44–71% for Mg (Figures 4 and 5). Evapotranspiration rate under the local climate conditions of Almería have an important influence on mass flow of Ca and Mg ions and their accumulation in leaf. Calcium import to fruit is carried out principally through the xylem, as low Ca concentrations in phloem show (Chiu and Bould 1976). A high vapor-pressure deficit (VPD) generates disequilibrium on Ca distribution in leaf and fruit, causing lower accumulation in fruit as a result of the lower transpiration rate of this organ (Lao 2002). This

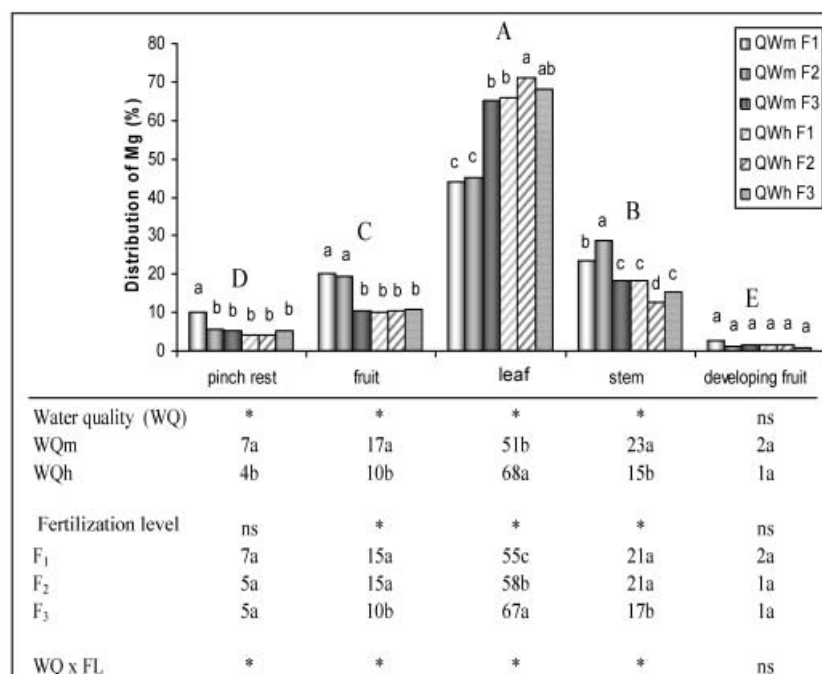


Figure 5. Magnesium distribution in different plant organs: ns: nonsignificant; *, significant by analysis of variance (ANOVA) at $p \leq 0.05$. Means with different small letters indicate significant differences between treatments, and means with different capital letters indicate significant differences between plant organs using Duncan's test at $p \leq 0.05$.

assay shows significant differences between Ca levels in leaf but not in fruit (Figure 4). Leaves are usually used to evaluate Ca presence in the plant, but Ca content in leaves is not necessary well correlated with Ca level in fruit (El-Gizawy and Adams 1986). Although Ca behavior has been studied more than Mg behavior, results of this assay show a similar method with regard to extraction and distribution of Ca and Mg in the plant.

Leaf, fruit, and stem were the principal Na sinks for all treatments (Figure 6), but the behavior of Na distribution in different organs was dissimilar. Treatments with the highest NPK concentrations, or highest EC (WQmF₃, WQhF₂, and WQhF₃), presented the highest levels of Na in the leaf, whereas with the WQmF₂ treatment the highest Na concentration was found in the fruit. Sodium accumulation in tissues is a progressive process. Young tissues (pinch rest and developing fruit) have a small Na concentration, but adult tissues present progressive Na accumulation. Sodium distribution in fruit (Figure 6) was modified by the salinity level and was most significant when there were no saline treatments. This result agrees with Plaza et al. (2006) concerning

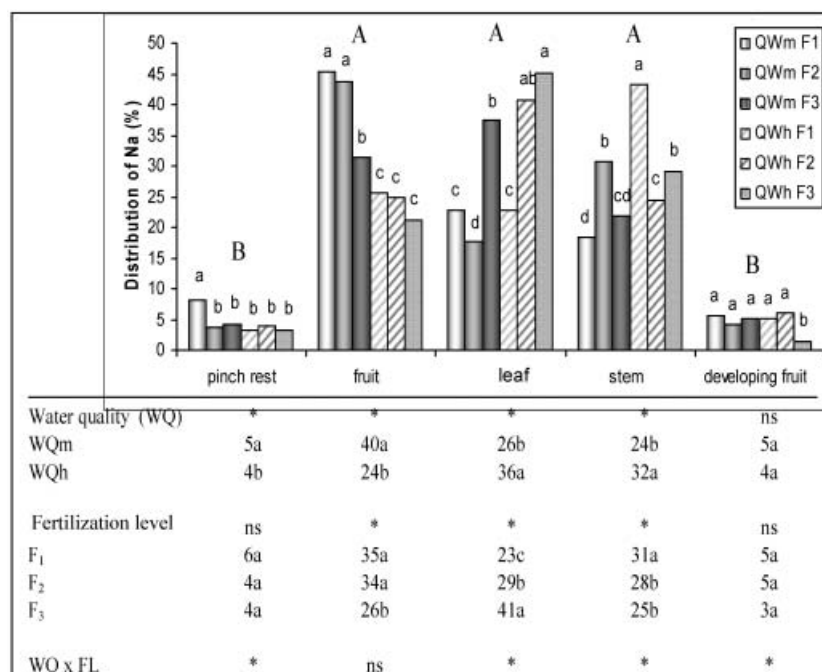


Figure 6. Sodium distribution in different plant organs: ns: nonsignificant; *, significant by analysis of variance (ANOVA) at $p \leq 0.05$. Means with different small letters indicate significant differences between treatments, and means with different capital letters indicate significant differences between plant organs using Duncan's test at $p \leq 0.05$.

Cordyline fruticosa under a saline gradient, with a high Na concentration in tissues far from the root when low Na concentration is found in the soil, to a tolerance threshold of Na when exclusion mechanisms are activated, avoiding massive transport of Na and, therefore, Na accumulation in fruits (Figure 6). Sodium accumulation in leaf and stem is a plant exclusion mechanism to protect fruit production.

CONCLUSIONS

Increasing the fertilization level raised the total N, P, K, Ca, Mg, and Na uptake by plant as well as P, K, Mg, and Na export by leaf and reduced it in the fruit. An increase in the N, K, Mg, and Na uptake by the plant was obtained by an increase in water salinity. This also reduced P, Mg, and Na export by fruit and increased it in the leaf. The main mineral constituent of the tomato plant was K, surpassing N content, and the minor constituent was P. All treatments showed a high productive efficiency of NPK, with the

fruit as a principal N, P, and K sink in all cases, and the leaf as the main Ca and Mg sink. Nevertheless, Na presented low levels in young tissues, whereas the levels were higher and similar in fruit, leaf, and stem.

ACKNOWLEDGMENTS

This work is part of the Project “Optimisation of Fertigation of Greenhouse Vegetable Crops,” supported by Alboran Agrícola S.A., Yara España S.A., and IFAPA (Consejería de Innovación Ciencia y Empresa, Junta de Andalucía).

REFERENCES

- Al-Karaki, G. N. 2000. Growth, sodium, and potassium uptake and translocation in salt stressed tomato. *Journal of Plant Nutrition* 23 (3): 369–379.
- AOAC. 1995. *Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists*, 16th ed. Gaithersburg, MD, USA.
- Ayers, R. S., and D. W. Westcot. 1987. *Calidad del agua para la agricultura* (Riego y Drenaje, no. 29). Rome: FAO.
- Baker, A. S. 1969. Colorimetric determination of nitrate in soil and plant extracts with brucine. *Journal of Agriculture and Food Chemistry* 17: 802.
- Bar-Yosef, B. 1986. Fertigation as a technique to optimize crop yield with special reference to vegetables. In *Proceedings of the Third International Conference of Irrigation*. The Irrigation Association ed. 87–97. Tel-Aviv.
- Black, C. A. (Ed.) 1965. *Methods of Soil Analysis, Part II: Chemical and Microbiological Properties*. Wisconsin: American Soc. of Agron. Inc.
- Brownell, P. F., and C. J. Crossland. 1972. The requirement for sodium as a micronutrient by species having the C4 dicarboxylic photosynthetic pathway. *Plant Physiology* 49: 794–797.
- Castilla, N. 1986. *Contribución al estudio de los cultivos enarenados en Almería: Necesidades hídricas y extracción de nutrientes del cultivo de tomates de crecimiento indeterminado en abrigo de polietileno*. PhD thesis, Universidad Politécnica de Madrid.
- Chapagain, B. P., and Z. Wiesman. 2004. Effect of potassium magnesium chloride in the fertigation solution as partial source of potassium on growth, yield, and quality of greenhouse tomato. *Scientia Horticulturae* 99:279–288.
- Chiu, T. F., and C. Bould. 1976. Effects of storage of calcium and other cations on ⁴⁵Ca mobility, growth and nutrients disorders of tomato plants (*Lycopersicon esculentum*). *Journal of the Science of Food and Agriculture* 27:969–977.
- Contreras, J. I., L. Segura, I. Pascual, and J. J. Catalá. 2007. Effect of the NPK fertilization and irrigation water quality of tomato fruit. *Acta Horticulturae (ISHS)* 747:481–484.
- El-Gizawy, A. M., and P. Adams. 1986. Effect of temporary calcium stress on the calcium status of tomato. *Acta Horticulturae* 178:37–43.

- Fisher, K. J., P. R. Johnstone, and M. A. Nichols. 2002. Nutrition of processing tomatoes. *Acta Horticulturae (ISHS)* 571:45–49.
- Fontes, P. C. R., and C. P. Ronchi. 2002. Critical values of nitrogen indices in tomato plant grown in soil and nutrient solution determined by different statistical procedures. *Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília* 37 (10): 1421–1429.
- Grattan, S. R., and C. M. Grieve. 1999. Salinity–mineral nutrient relations in horticultural crops. *Scientia Horticulturae* 78:127–157.
- Hajibagheti, M. A., A. R. Yeo, T. J. Flowers, and J. C. Collins. 1989. Salinity resistance in *Zea mays*: Fluxes of potassium, sodium and chloride, citriplasmic concentrations, and microsomal membrane lipids. *Plant Cell Environment* 12:753–757.
- Jungk, A., C. J. Asher, D. G. Edwards, and D. Meyer. 1990. Influence of phosphate status on phosphate uptake kinetics of maize (*Zea mays*) and soybean (*Glycine max*). *Plant and Soil* 124 (2): 175–182.
- Kirkby, E. A., and A. H. Knight. 1977. Influence of the level of nitrate nutrition on ion uptake assimilation, organic acid accumulation, and cation-anion balance in whole tomato plants. *Plant Physiology* 60:349–353.
- Koroleff, F. 1970. Direct determination of ammonia in natural waters as indophenol blue (revised). In *Information on Techniques and Methods for Seawater Analysis* (Interlab Report 3), The International Council for the Exploration of the Sea Commission Meet C9_3: 19–22. Ashland.
- Lao, M. T. 2002. *Gestión del fertirriego de los invernaderos de Almería mediante el uso de sondas de succión*. PhD diss., Escuela Politécnica Superior de Ingenieros Agrónomos, Universidad de Almería, Spain.
- Läuchli, A., and E. Epstein. 1970. Transport of potassium and rubidium in plant root: The significance of calcium. *Plant Physiology* 45:639–641.
- Lazof, D., and J. M. Cheeseman. 1988. Sodium and potassium and potassium compartmentation and transport across the roots of intact *Spergularia marina*. *Plant Physiology*. 88:1274–1278.
- Lynch, J., and A. Läuchli. 1985. Salt stress disturbs the calcium nutrition in barley (*Hordeum vulgare* L.). *New Phytologist* 99:345–354.
- Magán, J. J., E. Casas, M. Gallardo, R. B. Thompson, and P. Lorenzo. 2005. Uptake concentrations of tomato crop in different salinity conditions. *Acta Horticulturae (ISHS)* 697:365–369.
- Malorgio, F., L. Incrocci, G. Carmassi, A. Pardossi, and F. Tognoni. 2001. Accumulo di Sali (NaCl) e consumo minerale in pomodoro coltivato in sistemi idroponici a ciclo chiso. *Italus Hortus* 8 (6): 43–48.
- Martínez, V., N. Berstein, and A. Läuchli. 1996. Salt-induced inhibition of phosphorous transport in lettuce plants. *Physiology Plantarum* 97:118–122.
- Maruo, T., M. Takagaki, and Y. Shinohara. 2004. Critical nutrient concentrations for absorption of some vegetables. *Acta Horticulturae* 644:493–499.
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (M. A. P. A.). 1994. Métodos Oficiales de Análisis. Tomo III. Secretaria General Técnica (M. A. P. A.), ed. Madrid.
- Mohammad, M., R. Shibli, M. Ajlouni, and L. Nimri. 1998. Tomato root and shoot response to salt stress under different levels of phosphorous nutrition. *Journal of Plant Nutrition* 21 (8): 1667–1680.

Salinity and Fertilization Influence on Tomato

513

- Olsen, S. R., C. V. Cole, F. S. Watanabe, and L. A. Dean. 1954. *Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate* (U.S. Dep. of Agric. Circ. 939). Washington, DC: U.S. Department of Agriculture.
- Plaza, B. M., L. M. Cervilla, A. López, S. Jiménez, M. Pérez, and M. T. Lao. 2006. Influencia del estrés salino (NaCl) en la absorción, la distribución y la concentración del Na y el Cl en Cordiline fruticosa var. "Red Edge." In *Nutrición mineral: Aspectos fisiológicos, agronómicos y ambientales*; ed. C. Lamsfus Arrien et al., vol2, 437–443. Pamplona: Universidad Pública de Navarra.
- Raghothama, K. G., and A. S. Karthikeyan. 2005. Phosphate acquisition. *Plant and Soil* 274: 37–49.
- Salinas, R., M. T. Lao, and L. Romero. 2006. Phosphorous and its use in agriculture. *Recent Research Developed in Nutrition* 7:1–45.
- Segura, L., J. I. Contreras, and P. Galindo. 2007. Response of greenhouse tomato crop to NPK fertilization and quality of irrigation water. *Acta Horticulturae (ISHS)* 747:485–488.
- Segura, M. L., R. Granados, J. L. Contreras, E. Martin, and J. M. Rodriguez. 2006. Greenhouse managements of the potassium fertilization of a green bean crop. *Acta Horticulturae (ISHS)* 700:145–148.
- Stanghellini, C., F. Kempkes, E. Heuvelink, A. Bonasia, A. Karas, and N. Botden. 2003. Water and nutrient uptake of sweet pepper and tomato as (un)affected by watering regime and salinity. *Acta Horticulturae* 614:591–597.
- Thomas, G. W. 1982. Exchangeable cations. In *Methods of soil analysis, part 2*, ed. A. L. Page, R. H. Miller, and D. R. Keeney, 159–165. Madison, Wisc.: ASA and SSSA.
- Zrenner, R., M. Stitt, R. Schmidt, U. Sonnewald, and R. Boldt. 2006. Pyrimidine and purine biosynthesis and degradation in plants. *Annual Review of Plant Biology* 57:805–836.

CAPÍTULO VII

Influences of Nitrogen and Potassium Fertigation on
Nutrient Uptake, Production, and Quality of Pepper
Irrigated with Disinfected Urban Wastewater



Influences of Nitrogen and Potassium Fertigation on Nutrient Uptake, Production, and Quality of Pepper Irrigated with Disinfected Urban Wastewater

JUANA I. CONTRERAS,¹ ENRIQUE EYMAR,²
JOSE G. LOPEZ,¹ MARIA T. LAO,³ AND MARIA L. SEGURA¹

¹Institute of Research and Training in Agriculture and Fisheries (IFAPA), Junta of Andalusia, Almería, Spain

²Department of Agricultural Chemistry, Faculty of Sciences, University Autonoma of Madrid, Madrid, Spain

³Department of Crop Production, School of Engineering, University of Almería, Almería, Spain

The use of regenerated water (RW) for irrigation of horticultural crops in the Mediterranean area could contribute to reduce fertilizer inputs, water consumption, and contamination of the environment. The nutrient content of RW and nutrient demand by crops needs to be match to achieve these benefits. This work studies the influence of different levels of nitrogen (N)–potassium (K) fertigation with purified wastewater obtained from Almería city, Spain, on yield, fruit quality, and macronutrient uptake of pepper plants. The experiment was conducted in a polyethylene greenhouse with pepper cv. Aifos, grown on a sand-mulched sandy loam soil using trickle irrigation. The experimental design was randomized blocks with four replicates. Six treatments were applied: two unfertilized controls (RW and ground water, GW) and four NK levels with regenerated water, RW (N_1K_1 , $N_1K_{1.5}$, $N_{1.5}K_1$, and $N_{1.5}K_{1.5}$). N_1K_1 is the recommended rate under local conditions, and 125 kg N ha^{-1} and 193 kg K ha^{-1} respectively are average nutrient concentrations in fertigation of $9.8 \text{ mM N (NO}_3^- + \text{NH}_4^+)$ and 5.4 mM K . The results showed that production parameters were equal in unfertilized RW irrigated plants compared to those irrigated with GW water, both resulting in low commercial production. Fertigation with N_1K_1 produced yields similar to the RW control. Significant increases in marketable yields, number, and weight of fruit were recorded with $N_{1.5}K_{1.5}$, $N_1K_{1.5}$, and $N_{1.5}K_1$ rates compared to RW control. The NK level had no effect on fruit quality attributes (pH, fruit firmness, total soluble solids, and titratable acidity of fruit). Nutrient uptake of plants followed the same order in all treatments: $K > N > \text{calcium (Ca)} > \text{magnesium (Mg)} > \text{phosphorus (P)}$. The treatment $N_{1.5}K_{1.5}$ showed the greatest uptake of N and P, and K uptake was similar to $N_1K_{1.5}$ and $N_{1.5}K_1$ treatments.

Keywords Calcium, fruit firmness, magnesium, nitrogen, NK rates, pH, phosphorus, potassium, sand mulch, titratable acidity, total soluble solids, uptake

Address correspondence to Maria L. Segura, Institute of Research and Training in Agriculture and Fisheries (IFAPA), Junta of Andalusia, Camino San Nicolás n. 1, 04745 La Mojonera, Almería, Spain. E-mail: marial.segura@juntadeandalucia.es

Introduction

The use of regenerated water for irrigation on the coast of Andalusia (southern Spain) is a strategy to mitigate water deficit of $364 \text{ hm}^3 \text{ year}^{-1}$ in the whole Andalusian Mediterranean basin (Andalusian Water Agency 2009) and the serious problem of nitrate (NO_3) pollution from agricultural practises in certain aquifers in this area. Of the $17 \text{ hm}^3 \text{ year}^{-1}$ of regenerated water used for irrigation, half is used in 2,500 ha of greenhouse crops in the Lower Shire Andarax in Almería (Andalusian Water Agency 2009). One of the benefits of using of wastewater for irrigation of horticultural crops is the moderate concentration of total salts and high concentration of nutrients [especially nitrogen (N), phosphorus (P), and potassium (K)] essential for plant nutrition (Segura et al. 2004). Improper application of either fertilization or irrigation with regenerated water can provide excessive nutrient applications, resulting in their accumulation in the soil, which negatively affects the yield and quality of production (Mohammad and Ayadi 2004). The effects of wastewater on production and fruit quality have had variable results in the literature, with some reports of increases in the size and weight of fruit and decreases in firmness and soluble solids content of tomatoes (Al-Lahham, El Assi, and Fallad 2003). On the other hand, pepper production has received relatively little attention in literature. Recommendations for nutrient solutions for use in sweet pepper production in Almería greenhouses for conventional water reported by Camacho (2003) were 9–13 mM of NO_3^- , 0.3–0.5 mM of ammonium (NH_4^+), and 4.0–5.4 mM of K^+ . According to soil available phosphorous (P), this nutrient may be supplied or not in the nutrient solutions; in Almería conditions, P concentrations in soils are normally high and consequently it does not represent a nutritionally limiting factor.

The aim of this study was to investigate the effect of regenerated water compared to conventional water from underground sources and NK fertilization on the production and sensory quality of pepper fruit and macronutrient uptake by plant.

Materials and Methods

Plant Culture and Treatments

The experiment was conducted in a polyethylene greenhouse (800 m^2) at the Research Centre and Agricultural Formation (IFAPA), La Cañada, Almería (southeast Spain) for 155 days. Pepper (*Capsicum annuum* L. var. Aifos) plants were grown from August 2007 to January 2008 with the treatments. The crop was grown on sand-mulched sandy loam soil (Lao 2004) using trickle irrigation. Soil pH was determined with a glass electrode in saturated paste extract (MAPA 1994). Soil organic matter was determined using the Walkley–Black method (Black 1965). Soil available K was determined by extraction with ammonium acetate following the Thomas method (1982) using atomic absorption spectrometry (Unican 969 AA spectrometer, Thermo Fisher Scientific, Waltham, Mass.). Nitrate was determined by means of colored complexes with brucine acid (Baker 1969) and ammonium based on the formation of blue-colored complexes of indophenol (Koroleff 1970). Soil available P was determined by extraction with sodium bicarbonate (Olsen et al. 1954). The main properties of soil were pH 8.6, 4.5% carbonates, electrical conductivity (EC) 1.8 dS m^{-1} , low organic-matter content (0.9 %) and mineral N [NO_3^- -N + NH_4^+ -N] (2 mg N kg^{-1}), medium-high level of available P (53 mg P kg^{-1}), and high available K (337 mg K kg^{-1}).

The experimental design used randomized blocks with four replicates. Six treatments were applied: two unfertilized controls (RW and conventional water, groundwater [GW])

and four NK levels with regenerated water (N_1K_1 , $N_1K_{1.5}$, $N_{1.5}K_1$, and $N_{1.5}K_{1.5}$). N_1K_1 is the recommended rate under local conditions (Contreras et al. 2006) corresponding to 125 kg N ha⁻¹ and 193 kg K ha⁻¹ and average nutrient concentrations of 9.8 mM N ($NO_3^- + NH_4^+$) and 5.4 mM K in the irrigation water. Similar P levels were applied to the fertilizer treatments. The composition of irrigation water and nutrient solutions are specified in Table 1. The RW was provided by Wastewater Reclamation, located in Viator (Almería). Water disinfection was performed by chlorination and ozonation. Irrigation rates were estimated according to evapotranspiration (ETc) and measures of soil matric potential at 15 cm deep by manual tensiometers (Irrometer, Riverside, Calif.) to maintain tension near 15 kPa.

Plant Analyses

Pepper fruit production was evaluated by determination of the following parameters: marketable fruit weight, number of fruits, and unmarketable fruit. Fruits of ten plants per experimental plot were collected after reaching commercial maturity status (green or red) from 11 August 2007 to 18 January 2008 and classified according to European Quality Standards and Marketing (Regulation EC 1455/1999, as amended by EC Regulation 46/2003).

The measurement of fruit quality was conducted at three harvest periods (78, 103, and 150 days after transplanting, DAT) on samples formed by 16 fruits per treatment. The hardness of fruit was determined with a fruit pressure tester (model FT 327; Facchini, Italy) using a tip 0.5 cm square (8 mm diam.). Two opposite slices from each fruit were homogenized, and the filtered juice was used for soluble solids content (SSC) measured by an Atago N1 Refractometer (Atago Co. Ltd., Tokyo, Japan), titratable acidity determined using a 0.1 M sodium hydroxide (NaOH) solution (AOAC 1995), and pH measured with a Crison pH meter (Crison Instruments, Barcelona Spain).

Whole plants, excluding the roots, were harvested at the end of the experiment (155 days). Eight plants per treatment were randomly selected for destructive sampling. Lateral shoots (pinch rest) were collected. Harvested fruits (40 fruits per treatment) were randomly selected at each harvest. Fresh samples of the different plant parts were dried at 70 °C to constant weight (DM), and the total mineral nutrient contents were determined in the samples. Nitrogen was determined by the micro-Kjeldahl procedure, P was determined by the phosphovanadomolybdate method (AOAC 1995), and K, Ca, and Mg were determined by atomic absorption spectrometry (Unicam 969 AA spectrometer, Thermo Fisher Scientific, Waltham, Mass.).

Data Analysis

Data were analyzed using analysis of variance (ANOVA). A multifactor ANOVA was also performed to determine the significant differences among treatments (least significant difference, LSD, at $P < 0.05$). Statistical analyses were performed with Statgraphics Plus 5.1 (Statgraphics Plus, Rockville, Md.).

Results and Discussion

Fruit Production

The unfertilized control treatments (GW and RW) did not show significant differences in the yield parameters in the periods studied (Table 2), and the results showed a low

Table 1
Irrigation water and nutrient solution characteristics

Treatment	pH	CE (dSm ⁻¹)	CO ₃ ²⁻ (mM)	HCO ₃ ⁻ (mM)	Cl ⁻ (mM)	SO ₄ ²⁻ (mM)	NO ₃ ⁻ (mM)	H ₂ PO ₄ ⁻ (mM)	NH ₄ ⁺ (mM)	Ca ²⁺ (mM)	Mg ²⁺ (mM)	Na ⁺ (mM)	K ⁺ (mM)	SAR
GW	7.09	1.21	0.00	1.25	4.65	4.63	0.95	0.00	0.00	2.89	3.13	5.07	0.14	2.92
RW	8.30	2.11	0.00	6.60	8.93	5.25	0.34	0.37	3.27	4.82	4.24	11.09	0.64	5.21
RW N ₁ K ₁		3.19	0.00	6.60	8.93	11.45	3.48	0.63	6.33	4.82	4.24	11.09	5.44	
RW N ₁ K _{1.5}		3.46	0.00	6.60	8.93	14.97	3.48	0.63	6.33	4.82	4.24	11.09	8.15	
RW N _{1.5} K ₁		3.43	0.00	6.60	8.93	11.45	5.96	0.63	8.76	4.82	4.24	11.09	5.44	
RW N _{1.5} K _{1.5}		3.71	0.00	6.60	8.93	14.97	5.96	0.63	8.76	4.82	4.24	11.09	8.15	

Table 2
Marketable and unmarketable yields of pepper fruit

Parameter	DAT ^a			
	0–78	79–103	104–150	Total
<i>Marketable yield: fruit yield (g⁻²)</i>				
GW	1112 b	1610 b	900 c	3623 c
RW	1136 b	1632 b	1235 bc	4003 bc
RW N ₁ K ₁	1493 a	1621 b	1355 ab	4468 b
RW N ₁ K _{1.5}	1564 a	2224 a	1569 ab	5357 a
RW N _{1.5} K ₁	1544 a	2405 a	1425 ab	5375 a
RW N _{1.5} K _{1.5}	1552 a	2308 a	1725 a	5585 a
<i>Marketable yield: number of fruit (m²)</i>				
GW	6.6 b	7.0 b	4.5 a	18.2 d
RW	6.9 b	6.8 b	5.0 a	18.6 cd
RW N ₁ K ₁	9.6 a	7.0 b	5.8 a	22.5 bc
RW N ₁ K _{1.5}	9.1 a	9.7 a	6.5 a	25.3 ab
RW N _{1.5} K ₁	9.2 a	10.2 a	5.9 a	25.4 ab
RW N _{1.5} K _{1.5}	10.3 a	9.5 a	7.2 a	27.0 a
<i>Unmarketable yield (g⁻²)</i>				
GW	0.0 a	8.9 a	0.0 a	8.9 a
RW	4.3 a	5.0 a	4.8 a	14.1 a
RW N ₁ K ₁	0.0 a	3.6 a	0.0 a	3.6 a
RW N ₁ K _{1.5}	2.9 a	3.8 a	2.1 a	8.8 a
RW N _{1.5} K ₁	0.0 a	3.7 a	11.6 a	15.3 a
RW N _{1.5} K _{1.5}	0.0 a	0.0 a	2.8 a	2.8 a

Note. Means with different letters in the same column indicate significant differences between treatments using LSD test at $P < 0.05$.

^aDays after transplanting.

commercial production in these treatments. Nutrients applied by fertigation significantly affected the early fruit yield of pepper (Table 2). The NK addition resulted in increased early production and the number of marketable fruit at 78 DAT compared to the unfertilized control treatments, but there was no response to the greater NK rate at the early period of production. The application of fertilizer increased production by 24% to 27% compared to treatment RW. The early production (78 DAT) represented 28 to 33%.

High rates of nutrient application (RWN₁K_{1.5}, RWN_{1.5}K₁, and RWN_{1.5}K_{1.5}) resulted in greater total marketable yield and number of fruits than the RWN₁K₁ treatment but showed no significant differences among the high rates themselves. The total marketable yield of RWN₁K_{1.5} and RWN_{1.5}K₁ were similar but greater (20% and 25%) than RWN₁K₁ and RWN_{1.5}K_{1.5}. Bar Tal et al. (2001) determined that the optimal values of N concentration for total fruit yield were 9.3 mM for a greenhouse-grown pepper crop in a Mediterranean climate. This result agrees with that observed in this experiment, where treatment RW N₁K_{1.5} (9.8 mM N) obtained one of the biggest productions. Similar results were obtained by Walid-Qawasmi, Husam-Najim, and Remon-Qubursi (1999), who measured good yields with the addition of 125 kg N ha⁻¹ in pepper.

The RW control treatment produced the same total yield of pepper fruits as obtained in the N₁K₁ treatment (Table 2). Crop yields obtained in the treatment RWN₁K₁ were similar

to those obtained in the same crop on similar development conditions (Contreras et al. 2006) and slightly less than normal yields obtained in the production area (6.3 kg m^{-2}) (Ministry of Agriculture and Fisheries 2009), probably due to a shorter growing cycle.

Quality Fruit Parameters

The type of water did not affect the fruit quality, with RW quality similar to the GW (Table 3). The NK fertilization did not significantly affect the quality parameters of pepper fruit. Treatments without fertigation had similar values of pH, acidity titratable, firmness, and total soluble solids to fertigation treatments. The results agree with those obtained by Del Amor et al. (2008), who found no differences in the firmness of the fruit of pepper to reduced N fertilization (7 mM). In general, the date of harvest did not affect the organoleptic quality of green fruit (Table 4). Juice pH values were 5.5, titratable acidity 19 mmolc L^{-1} , and soluble solids about 5.0° Brix . At the third harvest significant differences in certain quality parameters of green and red fruits were measured. Compared to red fruit, green fruit had a greater pH (5.6 vs. 4.8), lower titratable acidity (20 mmolc L^{-1} vs. 60 mmolc L^{-1}), greater firmness (4.4 kg vs. 3.8 kg), and lower total soluble solids (5.0° vs. 8.0° Brix). This is probably a result of earlier maturity of the green fruit, since our results are in good agreement with Niklis, Siomos, and Sfakiotakis (2002), who reported that the acidity and total soluble solids increased with fruit ripening. The total soluble solids recorded in the red fruit are consistent with the values obtained by Eissa et al. (2007), although they are above the range established by Urrestarazu (2004) (i.e., 4.5 to 7° Brix for California-type pepper red square). The firmness values were somewhat less than those reported by Urrestarazu (2004), probably because the fruit was more mature.

Total Nutrient Uptake by Pepper Crop

The treatments resulted in significant differences in the amounts of nutrients taken up by plant shoots. Treatment RW 1.5N1.5K presented the greatest uptake of N and P (Table 4), as a result of its greater production of plant dry material (data not shown), because no significant differences in the concentration of nutrients of plant tissue were measured (data not shown). The lowest nutrient uptake was observed in the GW treatment (Table 4).

The NK fertilization treatments increased uptake of N, P, K, and Mg (Table 4) but did not affect nutrient concentrations in the tissue (data not shown). Nutrient content of vegetative tissue was not indicative of potential yield, matching the results of Marti and Mills (1991). Similarly, Kirkby and Knight (1977) detected an increase in N uptake when fertilizer N was applied and Al-Karaki (2000) obtained increased K uptake when the K concentration in soil solution was increased.

Total nutrient accumulation in the shoot for treatments with greater production ($\text{N}_1\text{K}_{1.5}$, $\text{N}_{1.5}\text{K}_1$, and $\text{N}_{1.5}\text{K}_{1.5}$) ranged from 234 to 315 kg N ha^{-1} , 96 to 114 kg P ha^{-1} , 262 to 286 kg K ha^{-1} , 85 to 93 kg Ca ha^{-1} , and 42 to 47 kg Mg ha^{-1} . Fontes, Dias, and Graca (2005) characterized shoot nutrient uptake curves and a model was developed to estimate N and K rates to be applied in sweet pepper (*Capsicum annuum* L.) in an unheated greenhouse. They obtained yields and N and K uptakes similar to those obtained in this experiment (52 t ha^{-1} , 193 kg N ha^{-1} , and 247 kg K ha^{-1}). Nutrient uptake followed the same order in all treatments: $\text{K} > \text{N} > \text{Ca} > \text{Mg} > \text{P}$ (g m^{-2}) similar to measurements performed by Fontes, Dias, and Graca (2005). In contrast Noh-Medina, Borges-Gómez, and Soria-Fregoso (2010) found the following order: $\text{N} > \text{K} > \text{Ca} > \text{Mg} > \text{P}$, which may be due to the variety of pepper studied and the growth system conditions.

Table 3
Juice pH, titratable acidity, firmness, and total soluble solids of fruit

Parameter	DAT ^a				Significance ^b
	0–78	79–103	104–150		
			Green	Red	
<i>Juice pH</i>					
GW	5.44 a A	5.37 a A	5.57 a A	4.77 a B	*
RW	5.47 a B	5.41 a B	5.66 a A	4.73 a C	*
RW N ₁ K ₁	5.36 a B	5.48 a AB	5.69 a A	4.75 a C	*
RW N ₁ K _{1.5}	5.45 a A	5.42 a A	5.60 a A	4.76 a B	*
RW N _{1.5} K ₁	5.39 a B	5.42 a B	5.66 a A	4.85 a C	*
RW N _{1.5} K _{1.5}	5.50 a A	5.51 a A	5.64 a A	4.83 a B	*
<i>Titratable acidity (mmolc citric acid / L juice)</i>					
GW	19.13 a B	15.73 a B	18.15 a B	57.38 a A	*
RW	12.69 a B	14.64 a B	16.59 a B	58.74 a A	*
RW N ₁ K ₁	17.17 a B	16.59 a B	18.54 a B	64.01 a A	*
RW N ₁ K _{1.5}	15.22 a B	15.61 a B	16.20 a B	58.35 a A	*
RW N _{1.5} K ₁	15.61 a B	16.39 a B	19.91 a B	64.01 a A	*
RW N _{1.5} K _{1.5}	13.86 a B	13.86 a B	16.98 a B	56.21 a A	*
<i>Firmness (kg cm^{−1})</i>					
GW	4.47 a A	4.91 a A	4.62 a A	4.04 a A	Ns
RW	5.21 a A	4.57 a AB	4.49 a AB	3.70 a B	*
RW N ₁ K ₁	4.63 a B	5.26 a A	4.70 a B	3.95 a C	*
RW N ₁ K _{1.5}	4.44 a A	4.45 a A	4.42 a A	3.82 a A	Ns
RW N _{1.5} K ₁	4.70 a A	4.63 a A	4.45 a A	3.77 a A	Ns
RW N _{1.5} K _{1.5}	4.47 a A	4.44 a A	4.04 a A	3.98 a A	Ns
<i>Total soluble solids (°Brix at 20 °C)</i>					
GW	4.61 a B	4.54 a B	4.93 a B	8.38 ab A	*
RW	4.73 a B	4.73 a B	5.03 a B	8.61 ab A	*
RW N ₁ K ₁	4.65 a B	4.85 a B	5.18 a B	9.15 a A	*
RW N ₁ K _{1.5}	4.68 a B	4.93 a B	5.01 a B	8.99 a A	*
RW N _{1.5} K ₁	4.51 a C	4.98 a BC	5.34 a B	9.03 a A	*
RW N _{1.5} K _{1.5}	4.61 a C	4.59 a C	5.36 a B	7.98 b A	*

Note. Values in the same column followed by different letters indicate significant differences between treatments at $P < 0.05$.

^aDays after transplanting.

^bIn this column, significant differences between harvesting periods are shown. Ns, not significant. Values in the same line followed by different capital letters indicate significant differences between values.

*Significant at $P < 0.05$.

Conclusions

Irrigation using regenerated water produced similar pepper yields and organoleptic quality compared to conventional water sources. These results served as the basis for establishing the technical criteria for fertigation of pepper using regenerated water. The NK fertigation

Table 4
Total nutrient uptake by plant

Treatment	Total nutrient uptake (g ⁻²)				
	N	P	K	Ca	Mg
GW	13.6 d	6.67 e	19.0c	6.85 b	3.24d
RW	16.0c	0.75d	22.3b	7.89a	3.69cd
RW N ₁ K ₁	17.1c	0.86cd	23.6b	8.45a	3.97bc
RW N ₁ K _{1.5}	19.0b	0.96bc	27.2a	9.01a	4.22abc
RW N _{1.5} K ₁	19.0b	1.01b	26.2a	9.25a	4.69a
RW N _{1.5} K _{1.5}	21.1a	1.14a	28.6a	8.50a	4.48ab

Note. Means with different letters in the same column indicate significant differences between treatments using LSD test at $P < 0.05$.

level is very important for early production period, as applications of N and K from transplanting to the first harvest of fruit and greater rates of K until the end of the harvest period contributed to more efficient pepper production.

Acknowledgments

The work has been funded by the Ministry of Education and Science (Project INIA RTA2006-00032-00-00), European funds FEDER, and the Institute of Agricultural Research and Training and Fisheries (IFAPA), Department of Agriculture and Fisheries (Junta of Andalusia).

References

- Al-Karaki, G. N. 2000. Growth, sodium, and potassium uptake and translocation in salt-stressed tomato. *Journal of Plant Nutrition* 23 (3): 369–379.
- Al-Lahham, O., N. M. El Assi, and M. Fallad. 2003. Translocation of heavy metals to tomato (*Solanum lycopersicom* L.) fruit irrigated with treated wastewater. *Scientia Horticulturae* 113 (3): 250–254.
- Andalusian Water Agency. 2009. Available at <http://web.agua.junta-andalucia.es/agenciadelagua/>.
- AOAC. 1995. *Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists*, 16th ed. Washington, D.C.: AOAC.
- Baker, A. S. 1969. Colorimetric determination of nitrate in soil and plant extracts with brucine. *Journal of Agriculture and Food Chemistry* 17:802.
- Bar Tal, A., B. Aloni, L. Karni, J. Oserovitz, A. Hazan, M. Itach, S. Gantz, A. Avidan, I. Posalski, N. Tratkovski, and R. Rosenberg. 2001. Nitrogen nutrition of greenhouse pepper, I: Effects of nitrogen concentration and NO₃:NH₄ ratio on yield, fruit shape, and the incidence of blossom-end rot in relation to plant mineral composition. *HortScience* 36 (7): 1244–1251.
- Black, C. A. 1965. *Methods of soils analysis, part 2: Chemical and microbiological properties*. Madison, Wisc.: American Society of Agronomy.
- Camacho, F. 2003. *Técnicas de Producción en Cultivos Protegidos*. Almería, Spain: Instituto de Estudios de Cajamar.
- Contreras, J. I., P. Galindo, J. J. Catala, and M. L. Segura. 2006. Response of greenhouse pepper crop to fertilizer levels and different qualities of irrigation water. *Acta Horticulturae* 700:203–206.

- Del Amor, F. M., A. Serrano-Martínez, M. I. Forteab, P. Leguac, and E. Núñez-Delicado. 2008. The effect of lant-associative bacteria (*Azospirillum* and *Pantoea*) on the fruit quality of sweet pepper under limited nitrogen supply. *Scientia Horticulturae* 117 (3): 191–196.
- Eissa, H. A., B. E. Mostafa, and A. S. Hussein. 2007. Capsaicin content and quality characteristics in different local pepper varieties (*Capsicum annum*) and acid-brine pasteurized puree. *Journal of Food Technology* 5 (3): 246–255.
- Fontes, P. C. R., E. N. Dias, and R. N. Graca. 2005. Nutrient uptake curves and a method to estimate nitrogen and potassium rates in sweet pepper fertigation. *Horticultura Brasileira* 23 (2): 275–280.
- Kirkby, E. A., and A. H. Knight. 1977. Influence of the level of nitrate nutrition on ion uptake assimilation, organic acid accumulation, and cation–anion balance in whole tomato plants. *Plant Physiology* 60:349–353.
- Koroleff, F. 1970. Direct determination of ammonia in natural waters as indophenol blue (revised). In *Information on techniques and methods for seawater analysis*. International Council for the Exploration of the Sea. Interlaboratory Report. 3:19–22.
- Lao, M. T. 2004. The mulching sandy soil and their management fertigation in horticultural production. *Trends in Soil Science* 3:71–82.
- MAPA. 1994. *Métodos Oficiales de Análisis*, vol. 3. Madrid: Secretaria General Técnica.
- Marti, H. R., and H. A. Mills. 1991. Nutrient uptake and yield of sweet pepper as affected by stage of development and N form. *Journal of Plant Nutrition* 14 (11): 1165–1175.
- Ministry of Agriculture and Fisheries. 2009. *Anuario de estadísticas Agrarias y Pesqueras de Andalucía 2006*. Sevilla, Spain: Consejería de Agricultura y Pesca, Junta de Andalucía.
- Mohammad, M. J., and M. Ayadi. 2004. Forage yield and nutrient uptake as influenced by secondary treated wastewater. *Journal of Plant Nutrition* 27 (2): 351–365.
- Niklis, N. D., A. S. Siomos, and E. M. Sfakiotakis. 2002. Ascorbic acid, soluble solids, and dry matter content in sweet pepper fruit: Change during ripening. *Journal of Vegetable Crop Production* 8 (1): 41–51.
- Noh-Medina, J., L. Borges-Gómez, and M. Soria-Fregoso. 2010. Nutrimental composition of biomass and conductive tissue in habanero pepper (*Capsicum chinense* Jacq.). *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 12:219–228.
- Olsen, S. R., C. V. Cole, F. S. Watanabe, and L. A. Dean. 1954. *Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate* (U.S. Department of Agriculture Circular 939). Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office.
- Segura, M. L., M. R. Granados, J. Moreno, and M. Urrestarazu. 2004. Response of greenhouse melon and tomato crops to wastewater fertirrigation. *Acta Horticulturae* 633:391–396.
- Thomas, G. W. 1982. Exchangeable cations. In *Methods of soil analysis, part 2*, ed. A. L. Page, R. H. Miller, and D. R. Keeney, 159–165. Madison, Wisc.: ASA and SSSA.
- Urrestarazu, M. 2004. *Tratado de cultivos sin suelo*, 3rd ed. Madrid, Spain: Ed. Mundi-Prensa.
- Walid-Qawasmi, M., M. J. Husam-Najim, and Remon-Qubursi. 1999. Response of bell pepper grown inside plastic houses to nitrogen fertigation. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 30 (17/18): 2499–2509.

CAPÍTULO VIII

Dry-Matter Allocation and Nutrient Uptake Dynamic
in Pepper Plant Irrigated with Recycled Water
by Different Nitrogen and Potassium Rate



Dry-Matter Allocation and Nutrient Uptake Dynamic in Pepper Plant Irrigated with Recycled Water by Different Nitrogen and Potassium Rate

JUANA I. CONTRERAS,¹ JOSE G. LÓPEZ,¹ MARIA T. LAO,²
ENRIQUE EYMAR,³ AND MARIA L. SEGURA¹

¹Institute of Research and Training in Agriculture and Fisheries (IFAPA), Junta of Andalusia, Almería, Spain

²Department of Crop Production, School of Engineering, University of Almería, Almería, Spain

³Department of Agricultural Chemistry, Faculty of Sciences, University Autonoma of Madrid, Madrid, Spain

*As a consequence of increasing water demand, lack of natural water resources, and use of high amounts of fertilizers in the greenhouse crops in arid and semi-arid areas, the use of reclaimed municipal wastewaters is a valuable option, although the knowledge of plant nutritional requirements becomes more important to avoid imbalances caused by the nutrients present in reclaimed wastewater and to attain efficient nutrient use. An experiment was conducted with greenhouse-grown sweet pepper (*Capsicum annuum* L. var. Aifos) on a sand-mulched sandy loam soil and fertigation with recycled municipal wastewater and inorganic fertilizer treatments. Five treatments were applied: control with no nitrogen (N) or potassium (K) supplied (N_0K_0) and four different doses of N and K as the mean elements with possible imbalances: N_1K_1 , $N_1K_{1.5}$, $N_{1.5}K_1$, and $N_{1.5}K_{1.5}$. N_1K_1 was the recommended rate under local conditions (125 kg N ha^{-1} and 193 kg K ha^{-1}). Eight plants per treatment were collected at five growth stages (0, 56, 84, 113, and 155 days after the seedling transplant, DAT). Dry matter (DM) and N, phosphorus (P), K, calcium (Ca), and magnesium (Mg) concentrations in fruit, leaf, stem, and pruning wastes were measured for each sampling date. For all treatments, the period of largest extraction of nutrient by plant occurred from 113 to 155 DAT, which coincides with the greatest accumulation of dry matter. Plant nutrient distribution showed that fruit is the largest sink of N, K, and P. The NK levels showed no effect on DM and nutrient uptake in the periods of vegetative growth, fruiting, and fruit growth. Nutrient uptakes by the plant were not affected by NK level applied. The NK rates could be lowered significantly without reducing DM and nutrient total uptake by plant during vegetative growth, flowering, and early fruit development periods, when using reclaimed municipal wastewater. The fertigation with greater rates of N and K for the harvest period can be considered as an adequate and sustainable procedure to grow greenhouse pepper.*

Keywords Fertigation, greenhouse, NK fertilizer efficiency, sand-mulch soil

Address correspondence to Maria L. Segura, Institute of Research and Training in Agriculture and Fisheries (IFAPA), Junta of Andalusia, Camino San Nicolás n. 1, 04745 La Mojónera, Almería, Spain. E-mail: marial.segura@juntadeandalucia.es

Introduction

The reuse of reclaimed water for Erie patient is considered a strategic resource to alleviate the great structural water deficit in the coast of Andalusia (southern Spain) (Andalusian Water Agency 2009). Of reclaimed water used for irrigation, 50% is used for irrigation of 2,500 ha of crops in greenhouses in the Lower Shire Andarax in Almería (Andalusian Water Agency 2009). One of the justifications for the reuse of wastewater for irrigation of horticultural crops is the moderate concentration of salts, such as sodium chloride (NaCl) and high nutrients, especially nitrogen (N), phosphorous (P), and potassium (K), that are essential for plant nutrition (Segura et al. 2004).

Adequate and sustainable plant nutrition is based in the precise knowledge of nutrient requirements by plants, as well as the dynamics of uptake and accumulation that occur in different organs and tissues (Segura et al. 2009; Choi and Lee 1992). Excess N, especially the ammonium form (NH_4^+), impairs the absorption of nutrients such as calcium (Ca) because of competition for uptake and N's promotion of excessive vegetative growth at the expense of supply to the fruits (Fallahi et al. 1997).

Use of high amounts of fertilizers in greenhouse production leads to important environmental problems because of the leaching of elements, mainly nitrate (NO_3^-) (Castilla 1986; Martínez 1987). The NO_3^- contamination detected in groundwater in some parts of Spanish producing regions demonstrates that the high inputs of N fertilizer normally applied to those crops significantly exceed plant uptake. The reuse of wastewater for irrigation of horticultural crops in greenhouses in the Lower Shire Andarax in Almería is based in the moderate concentration of salts, such as NaCl, and high levels of some nutrients, especially N (in NH_4^+ form). The strong concentration of K detected in agricultural soils demonstrates that the use of fertilization practices does not conform to the actual needs of crops. While the retention of this element in the soil prevents infiltration to aquifers through leaching irrigation water, a buildup in the soil may occur over time. This can cause a negative effect on nutrient uptake and a reduction in efficiency of fertilizer use. This situation shows that the knowledge of plant nutritional requirements is necessary to develop an efficient fertigation with the least environmental impact (Segura et al. 2000). The research reported here indicates the influence of different levels of N and K supply (applied by fertigation with reclaimed municipal wastewaters) on nutrient uptake and distribution in pepper plants.

Materials and Methods

Plant Culture and Treatments

The experiment was conducted in an 800-m² polyethylene greenhouse located at the Research Centre and Agricultural Formation (IFAPA) in La Cañada, Almería (southeast Spain). Peppers plants (*Capsicum annuum* L. var. Aifos) were transplanted on 21 August 2007 with a plant density of 2 plants m⁻². The experiment ended on 23 January 2008, lasting 155 days. The crop was grown on sand-mulched sandy loam soil, which is a standard cropping system of the area. This type of soil was made by adding a 10- to 15-cm layer of soil with variable texture (clay to sandy loam) on top of natural soil, adding 2 cm of manure, and then covering the manure with a layer of around 10 cm of sand. The daily average maximum, mean, and minimum temperatures, along the experiment, were 28, 20, and 16 °C, respectively, and the daily average maximum, mean, and minimum relative humidity, along the experiment, were 82%, 63%, and 53%, respectively. Soil pH was determined

with a glass electrode in saturated paste extract (MAPA 1994). Soil organic matter was determined using the Walkley–Black method (Broadbent 1965). Soil available K was determined by extraction with ammonium acetate following the Thomas method (1982) using atomic absorption spectrometry (Unican 969 AA Spectrometer, Thermo Fisher Scientific, Waltham, Mass.). Nitrate was determined by means of colored complexes with brucine acid (Baker 1969) and ammonium was based on the formation of blue-colored complexes of indophenol (Koroleff 1970). Soil available P was determined after extraction with sodium bicarbonate (Olsen et al. 1954).

The pH of the soil was 8.6, and soil contained 4.5% carbonates. The electrical conductivity of saturated soil extract was 1.8 dS m^{-1} and it had low organic mineral (0.9%) and mineral N (NO_3^- plus NH_4^+ , 2 mg kg^{-1}) contents, medium-high available P (53 mg kg^{-1}), and high available K (337 mg kg^{-1}).

Five fertilizer treatments were established and consisted of applying five NK fertilization levels: N_0K_0 , no contribution to NK, with fertigation only applied by the irrigation water (contribution of 46 kg N ha^{-1} and 23 kg K ha^{-1}); N_1K_1 , contribution of 125 kg N ha^{-1} and 193 kg K ha^{-1} according to the extraction of the crop in the greenhouse in southeast Spain, with similar season (summer–winter cycle) and yield (56 t ha^{-1}) (Contreras et al. 2006); $\text{N}_1\text{K}_{1.5}$, contribution of 125 kg N ha^{-1} and 290 kg K ha^{-1} ; $\text{N}_{1.5}\text{K}_1$, contribution of 188 kg N ha^{-1} and 193 kg K ha^{-1} ; and $\text{N}_{1.5}\text{K}_{1.5}$, contribution of 188 kg N ha^{-1} and 290 kg K ha^{-1} . The nutrient average composition of irrigation water and nutrient average solutions are specified in Table 1. Reclaimed water came from the Wastewater Treatment Station from the city of Almería, located in Viator (Almería), where it was disinfected with ozone. The irrigation system was drip independent distribution networks for each of the treatments. The irrigation rates were estimated according to the crop evapotranspiration (ETc) and measures of soil matric potential at 15 cm deep by manual tensiometers (Irrometer, Riverside, Calif.) to maintain tension near 15 kPa.

Preparation and Plant Analyses

Whole plants, excluding the roots, were harvested at five growth stages (0, 56, 84, 113, and 155 days after transplanting or DAT), corresponding to the stage end transplant, vegetative growth, flowering and early fruit development, ripening and early harvesting, and harvesting respectively). Eight plants per treatment were randomly selected for destructive sampling and separated into different plant fractions: developing fruit, leaf, and stem. Pruning wastes were collected from eight plants per treatment. Harvested fruits were randomly selected, collecting 40 fruits per treatment. Fresh samples for the different plant parts and different growth stages were dried at 70°C to constant weight, and dry-matter contents and contents of nutrients (N, P, K, Ca, and Mg) were determined in dry-matter samples on ashed (480°C) subsamples extracted in 6 M hydrochloric acid. Phosphorus in the acid solution was determined colorimetrically by the phosphovanadomolybdate method (AOAC 1995), and K, Ca, and Mg were determined by atomic absorption spectrometry (Unican 969 AA spectrometer, Thermo Fisher Scientific, Waltham, Mass.). Nitrogen was determined by the micro-Kjeldahl procedure.

Data Analysis

Data were analyzed using analysis of variance (ANOVA) with four completely randomized blocks. A multifactor ANOVA was also performed to identify the significant treatments. For each analysis, when ANOVA was significant, statistically significant differences between

Table 1
Average nutrient composition of irrigation water (N₀K₀) and nutrient solutions for treatments

Treatment	pH	EC (dS m ⁻¹)	CO ₃ ²⁻ (mM)	HCO ₃ ⁻ (mM)	Cl ⁻ (mM)	SO ₄ ²⁻ (mM)	N-NO ₃ ⁻ (mM)	P (mM)	N-NH ₄ ⁺ (mM)	Ca ²⁺ (mM)	Mg ²⁺ (mM)	Na ⁺ (mM)	K ⁺ (mM)	SAR
N ₀ K ₀	8.30	2.11	0.00	6.60	8.93	5.25	0.34	0.37	3.27	4.82	4.24	11.09	0.64	5.21
N ₁ K ₁		3.19	0.00	6.60	8.93	11.45	3.48	0.63	6.33	4.82	4.24	11.09	5.44	
N ₁ K _{1.5}		3.46	0.00	6.60	8.93	14.97	3.48	0.63	6.33	4.82	4.24	11.09	8.15	
N _{1.5} K ₁		3.43	0.00	6.60	8.93	11.45	5.96	0.63	8.76	4.82	4.24	11.09	5.44	
N _{1.5} K _{1.5}		3.71	0.00	6.60	8.93	14.97	5.96	0.63	8.76	4.82	4.24	11.09	8.15	

means were identified using a least significant difference (LSD) test ($P < 0.05$). Statistical analyses were performed with Statgraphics Plus 5.1 (Statgraphics, Warrenton, Va.).

Results and Discussion

Dry Matter and Nutrient Total Uptake by Crop

The treatments showed no significant differences in DM and amount of nutrients (N, P, K, Ca, and Mg) taken up by plants during the vegetative growth period, flowering, and early fruit development (Table 2). During the ripening and early harvesting stage, DM increased with the increasing dose of NK, but as in earlier periods of development N, P, K, Ca, and Mg uptake was not affected by fertilizer treatments. These results agree with those of previous studies (Segura et al. 2009), with greenhouse tomatoes, in which differences in NK application rates did not cause differences in extraction of nutrients by crop. This suggests that greater application of NK does not produce effects on nutrient concentrations

Table 2
Dry-matter (DM) and nutrient total uptake by plant during each stage of development (numbers correspond to data obtained during each treatment and stage; all values are in g m^{-2} , % with respect to total^a)

Treatment	DM	N	P	K	Ca	Mg
0–56 DAT ^b vegetative growth						
N ₀ K ₀	96.6 a (15)	2.59 a (16)	0.15 a (20)	3.91 a (18)	1.20 a (15)	0.72 a (20)
N ₁ K ₁	105.7 a (16)	2.78 a (16)	0.16 a (19)	4.49 a (19)	1.32 a (16)	0.82 a (21)
N ₁ K _{1.5}	106.7 a (14)	2.76 a (15)	0.15 a (16)	4.48 a (16)	1.39 a (15)	0.77 a (18)
N _{1.5} K ₁	99.1 a (13)	2.71 a (14)	0.15 a (15)	3.98 a (15)	1.33 a (14)	0.79 a (17)
N _{1.5} K _{1.5}	114.6 a (14)	2.99 a (14)	0.16 a (14)	4.65 a (16)	1.43 a (17)	0.84 a (19)
57–84 DAT flowering and early fruit development						
N ₀ K ₀	125.6 a (20)	3.10 a (19)	0.09 a (12)	4.59 a (21)	0.90 a (11)	0.17 a (5)
N ₁ K ₁	152.9 a (23)	3.38 a (20)	0.11 a (13)	5.01 a (21)	1.09 a (13)	0.18 a (5)
N ₁ K _{1.5}	127.7 a (17)	3.49 a (18)	0.11 a (11)	4.97 a (18)	0.95 a (11)	0.16 a (4)
N _{1.5} K ₁	159.8 a (21)	3.99 a (21)	0.13 a (13)	4.92 a (19)	0.85 a (9)	0.18 a (4)
N _{1.5} K _{1.5}	98.7 a (12)	3.03 a (14)	0.08 a (7)	3.48 a (12)	0.59 a (7)	0.07 a (2)
85–113 DAT ripening and early harvesting						
N ₀ K ₀	107.9 c (17)	0.84 a (5)	0.10 a (14)	1.12 a (5)	0.94 a (12)	0.37 a (10)
N ₁ K ₁	125.2 bc (19)	1.25 a (7)	0.20 a (23)	0.74 a (3)	0.60 a (7)	0.22 a (6)
N ₁ K _{1.5}	182.8 ab (24)	1.01 a (5)	0.13 a (14)	0.95 a (4)	0.97 a (11)	0.28 a (7)
N _{1.5} K ₁	189.1 a (25)	0.72 a (4)	0.14 a (14)	1.24 a (5)	0.71 a (8)	0.28 a (6)
N _{1.5} K _{1.5}	225.7 a (27)	1.50 a (7)	0.18 a (15)	2.34 a (8)	0.82 a (10)	0.34 a (8)
114–155 DAT harvesting						
N ₀ K ₀	298.1 bc (47)	9.42 c (59)	0.40 c (54)	12.7 c (57)	4.85 a (61)	2.43 c (66)
N ₁ K ₁	285.9 c (43)	9.71 c (57)	0.38 c (45)	13.4 c (57)	5.44 a (64)	2.76 bc (69)
N ₁ K _{1.5}	334.2 b (44)	11.8 b (62)	0.57 b (59)	16.8 ab (62)	5.69 a (63)	3.02 abc (72)
N _{1.5} K ₁	315.9 bc (41)	11.6 b (61)	0.58 b (58)	16.0 b (61)	6.36 a (69)	3.44 a (73)
N _{1.5} K _{1.5}	382.7 a (47)	13.6 a (64)	0.73 a (64)	18.2 a (64)	5.66 a (67)	3.23 ab (72)

Notes. Means with different letters in the same column indicate significant differences between treatments using the LSD test at $P < 0.05$.

^aValues in brackets are percentage uptake during all 155 days.

^bDays after transplanting.

in the tissue but increase yield; consequently nutrient content of vegetative tissue is not indicative of potential yield and DM (Marti and Mills 1991).

In the harvesting period (114 to 155 DAT), the increase of NK doses produced a significantly greater extraction of nutrients and DM production by the pepper plants but did not affect nutrient concentrations in the tissue (data not shown). Dry-matter production and N and K uptake were higher in the treatment with the greatest NK level ($N_{1.5}K_{1.5}$), intermediate in $N_1K_{1.5}$ and $N_{1.5}K_1$, and lowest in N_1K_1 and N_0K_0 (similar effects).

During this period, as in the others, Ca extraction was not affected by NK doses. For all treatments, the period of largest extraction of nutrient by plant occurred in this stage (113 to 155 DAT), which coincides with the greatest accumulation of DM. The extraction of N and K during this period as a percentage of the total ranged between 57% and 64%, and from 41% to 47% of DM, according to fertilizer treatment. These results are consistent with those reported by Rincon et al. (2005) for other solanaceous as tomato, which obtained the greatest accumulation of DM and uptake of N and K (around 50%) in the harvesting stage (from 154 to 196 DAT).

Nutrient uptake by the plant followed the same order in all treatments, $K > N > Ca > Mg > P$ ($g\ m^{-2}$), disagreeing with the results obtained by Noh-Medina, Borges-Gómez, and Soria-Fregoso (2010), who found the following order: $N > K > Ca > Mg > P$. This difference may be due to the variety of pepper studied and the culture system.

Nutrient Distribution in the Plant

Figure 1 shows distribution of DM, N, K, and other nutrients (P, Ca, and Mg) in each organ of the plant. Considering productive efficiency of nutrient (PE_N) as the percentage of fruit nutrient uptake compared to the total plant nutrient uptake, the fertilizer treatments showed a high PE_N for N and K, with the fruit as a principal nutrient sink in all the cases: 39–45% of N and 40–47% of K, according to the treatments (Figures 1b and d). For DM, productive efficiency (PE_{DM}) would be considered as the percentage of fruit DM produced compared to the total plant DM produced. All treatments presented a high PE_{DM} (43–50% of DM, according to the treatments) (Figure 1a). Considering the developing fruits, the PE_N increased, reaching the following values: 45–50% N, 47–54% K, and PE_{DM} 49–56%, according to the treatments. The results were slightly less than those reported by Segura et al. (2009) for tomato crop in conditions of similar culture, who found PE_N 43–59% of N and 51–63% of K, depending on the doses of N and K applied.

The fertilizer treatment affected the percentage of DM of fruit, with the N_0K_0 treatment producing the lowest percentage (43%), followed by treatment with $N_{1.5}K_{1.5}$ fertilization (48%). The same pattern as the DM shows the distribution of P of the fruit (Figure 1c). The distribution of N in plant was unaffected by fertilizer level (Figure 1b).

Calcium uptake by the fruit was 8–11%, with no differences between treatments (Figure 1e), and Mg uptake by the fruit was 10–12% (Figure 1f). The absence of statistical differences between treatments in Ca found in fruit indicates that an excess of N was not applied, especially in NH_4^+ form, which competes with Ca and promotes excessive vegetative growth (Fallahi et al. 1997). Leaf was the major Ca and Mg sink for all the treatments with 69–73% for Ca and 57–61% for Mg (Figures 1e and f). Similar results were obtained for tomato crops (Segura et al. 2009). The evapotranspiration rate under the local climate conditions of Almeria has an important influence on mass flow of Ca and Mg ions and their accumulation in leaf. Calcium transport to fruit is carried out principally through the xylem, as low Ca concentrations in phloem are found (Chiu and Bould 1976). A high

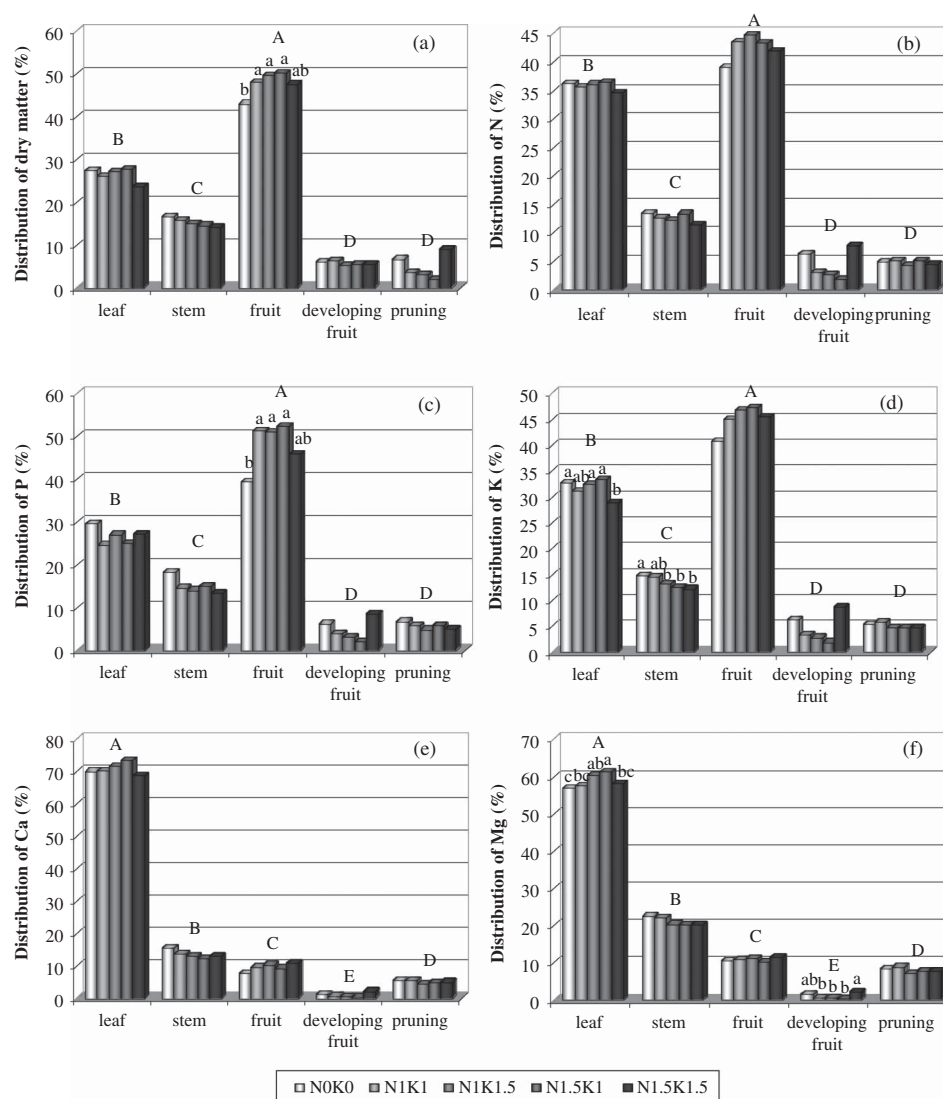


Figure 1 Dry matter (a), nitrogen (b), phosphorous (c), potassium (d), calcium (e), and magnesium (f) distribution in different plant organs. Means with different lowercase letters indicate significant differences between treatments, and means with different capital letters indicate significant differences between plant organs using the LSD test at $P < 0.05$.

vapor-pressure deficit generates imbalance on Ca distribution in leaf and fruit, causing lower accumulation in fruit as a result of the lower transpiration rate of this organ.

Conclusions

The NK rates could be lowered significantly without reducing DM and nutrient total uptake by plants during vegetative growth, flowering, and early fruit development periods when using reclaimed municipal wastewater. The fertigation with greater rates of N and K for

the harvest period can be considered as an adequate and sustainable procedure to grow greenhouse pepper.

Acknowledgments

The work has been funded by the Ministry of Education and Science (Project INIA RTA2006-00032-00-00), European funds FEDER, and the Institute of Agricultural Research and Training and Fisheries (IFAPA), Department of Agriculture and Fisheries (Junta of Andalusia).

References

- Andalusian Water Agency. 2009. Available at <http://web.agua.junta-andalucia.es/agenciadelagua/>.
- AOAC. 1995. *Official methods of analysis*, 16th ed. Washington, D.C.: Association of Official Analytical Chemists.
- Baker, A. S. 1969. Colorimetric determination of nitrate in soil and plant extracts with brucine. *Journal of Agriculture and Food Chemistry* 17:802.
- Broadbent, F. E. 1965. Organic matter. In: C.A. Black (Editor), *Methods of Soil Analysis, part II: Chemical and microbiological properties*. American Society of Agronomy, Madison, WI, pp. 1397–1400.
- Castilla, N. 1986. *Contribución al estudio de los cultivos enarenados en Almería: necesidades hídricas y extracción de nutrientes del cultivo de tomate de crecimiento indeterminado en abrigo de polietileno*. PhD diss., Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, Spain.
- Chiu, T. F., and C. Bould. 1976. Effects of storage of calcium and other cations on Ca mobility, growth, and nutrients disorders of tomato plants (*Lycopersicum esculentum*). *Science of Food and Agriculture* 27:969–977.
- Choi, J. S., and J. C. Lee. 1992. Seasonal trends in calcium accumulation in fruit of five apple cultivars. *Journal of Korean Society for Horticultural Science* 33 (2): 156–160.
- Contreras, J. I., M. L. Segura, P. Galindo, and J. J. Catalá. 2006. Response of greenhouse pepper crop to fertilizer and different qualities of irrigation water. *Acta Horticulturae* 700:203–206.
- Fallahi E., H. Conwayw, K. Hickey, and C. Sams 1997. The role of calcium and nitrogen in postharvest quality and disease resistance of apples. *HortScience* 32 (5): 831–835.
- Koroleff, F. 1970. Direct determination of ammonia in natural waters as indophenol blue (revised). In *Information on techniques and methods for seawater analysis*. International Council for the Exploration of the Sea. Interlaboratory Report. 3: 19–22.
- MAPA. 1994. *Métodos Oficiales de Análisis*, vol. 3. Madrid: Secretaria General Técnica.
- Marti, H. R., and H. A. Mills. 1991. Nutrient uptake and yield of sweet pepper as affected by stage of development and N form. *Journal of Plant Nutrition* 14 (11): 1165–1175.
- Martínez, A. 1987. *Comportamiento del riego bajo enarenado en invernadero: Balances de salinidad y fertilizantes, en especial en cultivos de pimiento y judía*. PhD diss., Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, Spain.
- Noh-Medina, J., L. Borges-Gómez, and M. Soria-Fregoso. 2010. Nutritional composition of biomass and conductive tissue in habanero pepper (*Capsicum chinense* Jacq.). *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 12:219–228.
- Olsen, S. R., C. V. Cole, F. S. Watanabe, and L. A. Dean. 1954. *Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate* (U.S. Department of Agriculture Circular 939). Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office.
- Rincón, L., L. A. Pérez, A. Abadía, and C. Pellicer. 2005. Yield, water use, and nutrient uptake of a tomato crop grown on coconut coir dust. *Acta Horticulturae* 697:73–79.

- Segura, M. L., J. I. Contreras, R. Salinas, and M. T. Lao. 2009. Influence of salinity and fertilization level on the nutrient distribution in tomato plants under a polyethylene greenhouse in the Mediterranean area. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 40:498–513.
- Segura, M. L., M. R. Granados, J. Moreno, and M. Urrestarazu. 2004. Response of greenhouse melon and tomato crops to wastewater fertirrigation. *Acta Horticulturae* 633:391–396.
- Segura, M. L., R. Moreno, S. Martínez, J. Pérez, and J. Moreno. 2000. Effect of wastewater irrigation on melon growth under greenhouse conditions. *Acta Horticulturae* 559:345–351.
- Thomas, G. W. 1982. Exchangeable cations. In *Methods of soil analysis, part 2*, ed. A. L. Page, R. H. Miller, and D. R. Keeney, 159–165. Madison, Wisc.: ASA and SSSA.

CAPÍTULO IX

Assessment of the Nitrogen and Potassium Fertilizer in Green Bean Irrigated with Disinfected Urban in the Mediterranean Area



Assessment of the Nitrogen and Potassium Fertilizer in Green Bean Irrigated with Disinfected Urban Wastewater

M. L. SEGURA,¹ JUANA ISABEL CONTRERAS PARÍS,¹
BLANCA MARÍA PLAZA,² AND M. T. LAO²

¹Institute of Research and Training in Agriculture and Fisheries (IFAPA), Junta of Andalusia, La Mojonera, Almería, Spain

²Department of Crop Production, Higher Polytechnic School, University of Almería, Agrifood Campus of International Excellence, Almería, Spain

Green bean Helda in autumn cycle (118 days) was grown under greenhouse conditions in sand-mulched sandy loam soil. The crop was irrigated with disinfected urban wastewater (DUW) obtained from ozone from the Almería Purifying Plant. The average nutrient parameters of DUW were 0.4 mM of nitrate (NO_3^-), 2.1 mM of ammonium (NH_4^+), 0.8 mM of potassium (K^+), and electrical conductivity (EC) 1.6 dS m^{-1} . Three different treatments were established: DUW without additional fertilization (F_{DUW}), DUW with fertilization until the recommended rate was obtained (10.0 mM of N and 3.4 mM of K) (F_{NK}), and DUW with fertilization until 1.5 F_{NK} rate (15.0 mM of N and 5.1 mM of K) ($F_{1.5\text{NK}}$) was obtained. The dry-matter production was not conditioned by the fertilizer level. Treatments F_{NK} and $F_{1.5\text{NK}}$ showed the greatest yield and uptake of N and K independent of the fertilizer level. The most nitrogen (N), calcium (Ca), and magnesium (Mg) were in the leaf, phosphorus (P) was high in fruit, and K was similar in leaf and fruit. With regard to the macronutrient absorption efficiency, the $F_{1.5\text{NK}}$ treatment showed the least N and K efficiency and the greatest soil salinity.

Keywords Dry matter, fertigation, macronutrients uptake, NK rates, sand mulch

Introduction

Nowadays, the use of purified wastewater in agriculture is considered as a resource within a global management framework in the Mediterranean area because of a scarcity of resources and as a solution to the ecological problems linked with the free disposal of wastewater in the environment. The south of Spain (Almería) has significant advantages in the production of horticultural crops, including green bean for export, based on its agroclimatic conditions. The greenhouse crop production system implies high nitrogen (N) and potassium (K) demand; however, the accumulation of these nutrients in agricultural soils shows the low efficiency of standard fertigation practices (Ramos, Gil, and Boluda 2002), due to poor knowledge concerning crop nutrient uptake (Segura et al. 2006). The disinfected urban wastewater (DUW) has high ammonium (NH_4^+) N levels and medium levels of K^+ (Segura et al. 2001). The NH_4^+ influences not only production and partitioning of dry

Address correspondence to Juana Isabel Contreras París, Institute of Research and Training in Agriculture and Fisheries (IFAPA), Junta of Andalusia. Camino San Nicolás n. 1, 04745 La Mojonera, Almería, Spain. E-mail: juanai.contreras@juntadeandalucia.es

matter but also water uptake. A lower water uptake rate under NH_4^+ supply was found by Pill and Lambeth (1977) and Adler, Wilcox, and Markhart (1996). In contrast to these findings, Walch-Liu et al. (2000) observed no effect of N form on the rate of water uptake in short-term experiments (2 days). This conflicting finding may be because the effects of N form on water uptake depend on the ontogenetic stage, the plant species (Claussen and Lenz 1999; Feil 1994), as well as the supplied concentration of N. The negative effect of NH_4^+ supply on leaf area is commonly explained by reduced cation uptake (Raab and Terry 1995), the less negative osmotic potential of leaves, and/or decreased root-to-shoot translocation of cytokinins. Guo et al. (2007) found a negative effect on dry-matter production in green bean with NH_4^+ as the only form of N. Green bean shows a high response potential to K fertilizer (Lima et al. 2001). In greenhouse conditions, K fertigation increases the nutrient uptake and its accumulation on the plant shoot (Segura et al. 2006). Nevertheless, the effects of NK fertigation using DUW on yield and nutrient uptake in green bean plant grown on sand-mulched soil under Mediterranean climate conditions is still relatively poorly documented.

Hence, the objective of this research was to study the effect of NK fertilizer level using DUW on soil salinity, bioproductivity, and nutrient uptake by green bean plants to evaluate the possibility of reducing the fertilizer application ratio.

Materials and Methods

The field experiment was conducted in a polyethylene greenhouse (1000 m²) between September 2003 and January 2004 at the Institute of Research and Training in Agriculture and Fisheries (IFAPA), Almería (longitude 2° 24' 03" W, latitude 36° 50' 13" , elevation 5 m). The treatment consisted of the application of three NK levels (0, 1, and 1.5 NK): DUW without additional fertilization (F_{DUW}), DUW with NK fertilization until the recommended rate was obtained (F_{NK}), and the 1.5 F_{NK} rate (Table 1). The total recommended rate (F_{NK}) corresponds to N 136 kg ha⁻¹ and K 131 kg ha⁻¹. The experimental design was in a randomized complete block with four replications. The nutrients were applied by daily fertigation with a trickle-feed irrigation system. Green bean plant Helda was planted on 24 September at a density of 3.2 plants m⁻² for a cycle of 118 days. The amount of irrigation was established to avoid moisture tension above 10–15 KP using a tensiometer measurement at a depth of 15 cm.

The crop was grown on sand-mulched sandy loam soil (Segura 1995), this being the cropping system of the area. The major soil characteristics were pH 8.2 (saturate extract),

Table 1
Irrigation water and nutrient solution medium characteristics

Parameter	CE (dS m ⁻¹)	NO ₃ ⁻ (mM)	H ₂ PO ₄ (mM)	NH ₄ ⁺ (mM)	K ⁺ (mM)	Ca ²⁺ (mM)	Mg ²⁺ (mM)	Na ⁺ (mM)	SO ₄ ²⁻ (mM)	SAR ^a
F_{DUW}	1.65	0.41	0.32	2.10	0.80	1.98	1.92	8.02	1.84	4.07
F_{NK}	2.70	0.41	0.32	10.0	3.40	1.98	1.92	8.02	5.25	
$F_{1.5\text{NK}}$	3.40	0.41	0.32	15.0	5.10	1.98	1.92	8.02	8.60	

^aSodium adsorption ratio.

organic matter 0.98%, available K 245 mg Kg⁻¹, mineral nitrogen (N) [nitrate (NO₃⁻) plus NH₄⁺] 9.1 mg kg⁻¹, and available phosphorus (P) 88 mg kg⁻¹.

Fruit production was evaluated according to the following parameters: total and marketable fruit weight, and total number of fruits and weight per fruit. Twice a week, ripe fruit was manually harvested during the season from 10 plants per experimental plot. Whole plants, excluding the roots, were harvested from each experimental plot (six plants per replication) throughout the experiment. Samples were partitioned into fruits, leaves, and stems. Harvested ripe fruits throughout the cycle were randomly selected every harvesting, collecting 20 fruits per experimental plot. Fresh samples were dried at 70 °C to constant weight and dry weight, and the total mineral content was determined. Total N was determined by the micro-Kjeldahl digestion procedure, total P was measured by the phosphovanadomolybdate method (AOAC 1995), and total K, calcium (Ca), and magnesium (Mg) were determined by atomic absorption spectrometry (Unican 969 AA Spectrometer, Thermo Fisher Scientific, Wellesley, Mass.).

Composite soil samples were taken from each experimental unit as well as from the top 15 cm below the sand layer during season development. Soil samples were dried at 50 °C (48 h). In the soil saturation extract (U.S. Salinity Laboratory Staff 1954 method), electrical conductivity (EC) was determined with a standard 25 °C platinum electrode (Crison model 523 conductivity meter; Crison Instruments, Barcelona).

Data was analyzed using analysis of variance (ANOVA) as a randomized complete block design, with three treatments and four replications. For each analysis, when ANOVA was significant, statistically significant differences between means were identified using Duncan's test ($P < 0.05$). Statistical analyses were performed with Statgraphics Plus 5.1 (Westminister, Calif.).

Results and Discussion

Soil Salinity

Nitrogen–K level affected soil salinity measured as EC of saturation extract (Figure 1). The initial soil salinity increased with the F_{1.5NK} treatment (EC 1.9 dS m⁻¹) by average values of 1.2 dS m⁻¹ at 78 DAS and 1.3 dS m⁻¹ at 118 DAS (EC 3.2 dS m⁻¹). The electrical conductivity of the F_{DUW} and F_{NK} treatments was similar in two periods at about

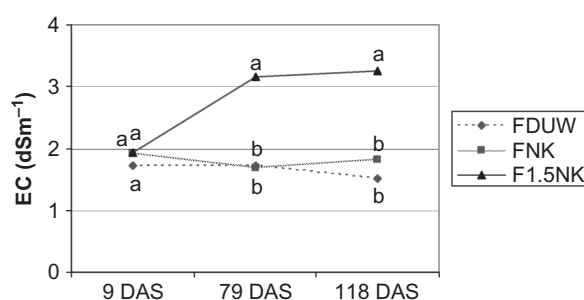


Figure 1. Electrical conductivity (EC) of saturated soil paste in response to fertilizer treatments at 9, 78, and 118 days after the sowing (DAS). Means with different letters in the same column indicate significant differences between treatments using Duncan's test at $P \leq 0.05$.

1.7 dS m⁻¹. Excessive applications of chemical fertilizers have been reported as factor contributing to soil salinity (Alam 1994). Optimal rates of NK for maximum green bean yield vary about from 116 to 138 kg ha⁻¹ of N and 206 to 210 kg ha⁻¹ of K in similar conditions (López-Galvez, Téllez, and Bretones 1991).

Fruit Production

The NK level affected yield (Table 2). The F_{DUW} yield parameters were similar to F_{NK} and greater than the yield obtained with F_{1.5NK}. This treatment produces 8.6 Tm ha⁻¹ of marketable yield, 19% less than F_{NK}. This decrease is related to lower fruit number per plant (20% less than F_{NK}). This effect on yield could be explained by the crop's low tolerance to salinity. Green bean is classified as sensitive to salinity (Maas and Hoffman 1977), and the yield per unit decreases by 19% when the salinity increases beyond the EC threshold of 1.0 dS m⁻¹. The F_{DUW} and F_{NK} obtained yields similar to the standard yields of the production area, but F_{1.5NK} did not (1.1 kg m⁻²) (CAP 2008). The fertilizer level of F_{1.5NK} (204N–196K kg ha⁻¹) produces salt accumulation from the harvest to the end of the growing cycle.

Nutrient Concentrations in Leaf, Stem, and Fruit

In general, NK level affected the percentages of N and K and the other nutrients P, Ca, and Mg (Table 3). The percentages of N and K in the leaf, stem, and fruit in F_{DUW} were the lowest, and F_{NK} and F_{1.5NK} treatments were similar. The Ca and Mg concentration in the leaf and stem reduced with the increasing NK level; in contrast, the percentage of Ca in the fruit was greater. The effect on Mg is not clear. This effect could be related to the increase of NH₄⁺ supplied, from 2.1 mM (F_{DUW}) to 15 mM (F_{1.5NK}).

Nutrient and Dry-Matter Total Uptake by Crop

Dry-weight production and P, Ca, and Mg uptake were not affected by the NK fertilizer level (Table 4). Nevertheless, significant differences in amounts of N and K uptake are shown in Table 4. The N and K uptake by plant was greater in F_{NK} and F_{1.5NK} treatments than in F_{DUW}. The greater nutrient uptake resulted from a greater concentration in the plant tissue (Table 3). The increase of nutrient uptake was 13% N and 38% K in both NK

Table 2
Yield and yield components

Treatment	Total yield		Marketable yield		
	Fruit weight (kg ha ⁻¹)	Number of fruits (ha ⁻¹)	Fruit weight (kg ha ⁻¹)	Number of fruits (ha ⁻¹)	Average weight fruit (g)
F _{DUW}	12560 a	65 × 10 ⁴ a	10480 a	52 × 10 ⁴ a	20 a
F _{NK}	13100 a	67 × 10 ⁴ a	10730 a	52 × 10 ⁴ a	21 a
F _{1.5NK}	10300 b	52 × 10 ⁴ b	8640 b	42 × 10 ⁴ b	21 a

Note. Means with different letters in the same column indicate significant differences between treatments using Duncan's test at $P \leq 0.05$.

Table 3

Concentration of N, P, K, Ca, and Mg (percentage of dry-weight basis) in leaf, stem, and fruit of green bean in three NK fertilizer levels

Plant part	Treatment	N (%)	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)
Leaf	F _{DUW}	1.83 b	0.14 a	1.26 b	5.03 a	0.83 a
	F _{NK}	2.03 a	0.17 a	1.79 a	4.49 b	0.78 a
	F _{1.5NK}	2.00 a	0.18 a	1.89 a	4.32 b	0.64 b
Stem	F _{DUW}	1.06 b	0.11 b	1.60 b	2.10 a	0.77 a
	F _{NK}	1.28 a	0.18 a	1.95 a	1.37 b	0.67 a
	F _{1.5NK}	1.22 a	0.12 b	1.87 a	1.24 b	0.53 b
Fruit	F _{DUW}	2.15 c	0.27 b	1.83 a	0.62 b	0.31 b
	F _{NK}	2.36 a	0.37 a	2.48 a	0.74 a	0.35 a
	F _{1.5NK}	2.26 b	0.31 ab	2.77 a	0.75 a	0.33 ab

Note. Means with different letters in the same column indicate significant differences between treatments using Duncan's test at $P \leq 0.05$.

Table 4

Dry matter (DM) and total nutrient uptake by plant and nutrient efficiency

Treatment	Total DM (kg ha ⁻¹)	Nutrient total uptake (kg ha ⁻¹)					Nutrient efficiency (%)				
		N	P	K	Ca	Mg	N	P	K	Ca	Mg
F _{DUW}	4084 a	71.3 b	6.7 a	62.7 a	112 a	26.3 a	197 a	65 b	195 a	138 a	55 a
F _{NK}	4253 a	80.9 a	9.3 b	84.4 b	107 a	25.7 a	60 b	90 a	64 b	131 a	54 a
F _{1.5NK}	4450 a	80.9 a	7.5 a	89.0 b	102 a	23.3 a	40 c	73 b	43 c	124 a	49 a

Note. Means with different letters in the same column indicate significant differences between treatments using Duncan's test at $P \leq 0.05$.

levels. The green bean nutrient uptake in these treatments was 81N–8.4P–87K kg ha⁻¹. The nutrient uptakes obtained are lower than those found by Ramakrishna, Krishnappa, and Umamaheswarappa (2002), who obtained greater NK and similar P uptake (119N–8.3P–125K kg ha⁻¹). Bertsch et al. (2003), with a similar marketable yield of 0.97 kg ha⁻¹, obtained greater NPK uptake (191N–25P–189K kg ha⁻¹), probably due to a different cropping system (cultivar, climate, etc.).

Nutrient Efficiency

Regarding the nutrient efficiency (expressed as percentage of the element in the plant tissue in relation to the total applied), the F_{NK} treatment obtained greater efficiency of N and K (60% and 64%) than F_{1.5NK}. The N and K extraction of F_{DUW} was much greater than that applied by wastewater. This seems to indicate that the crops are quite efficient in N and K uptake from the soil without a negative effect on the yield.

Nutrients and Dry-Matter Distribution by Plant

The percentage distributions of N, P, K, Ca, Mg, and DM in each organ of the plant is shown in Figure 2. Considering productive efficiency (PE) as the percent of fruit nutrient uptake compared to the total plant uptake, the three treatments have shown a medium–low

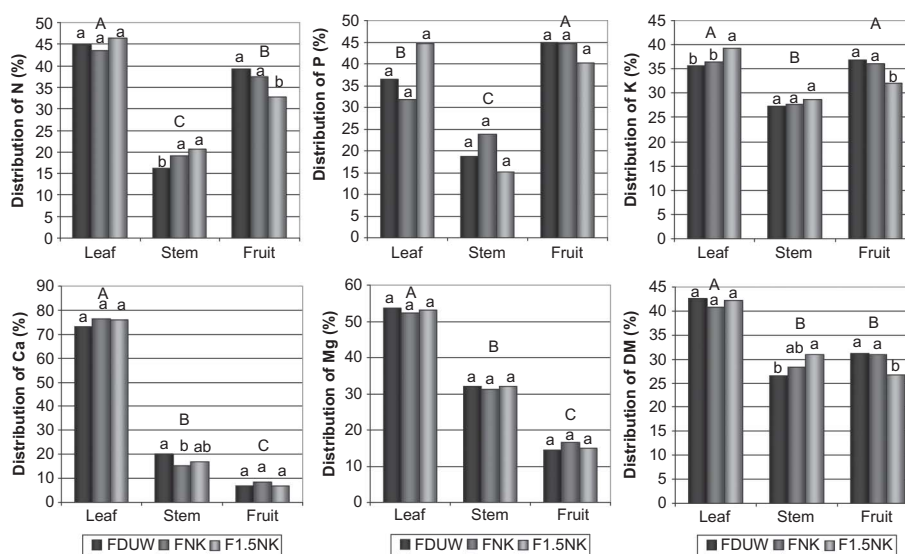


Figure 2. Nutrient (N, P, K, Ca, and Mg) and dry-matter (DM) distribution in different plant organs. Means with different lowercase letters indicate significant differences between treatments and means with different capital letters indicate significant differences between plant organs using Duncan's test at $P \leq 0.05$.

EP of nutrient and DM, where the vegetative part (leaf plus stem) accounted for 67–61% total N, 59–45% total P, 68–63% total K, 93–92% total Ca, 85%–83% total Mg, and 68%–75% total DM removed by plant. Similar results were obtained by López-Galvez, Téllez, and Bretones (1991), who found in greenhouse crops that the vegetative part contained the main N and DM removed by green bean plant, which showed similar PE and less productive efficiency than other horticultural crops (Segura et al. 2009). The leaf had high total N, Ca, and Mg contents, and the fruit had greater P and K, similar to results obtained by Valdez et al. (2002).

The distribution of P, Ca, and Mg in plant was unaffected by NK level. Nevertheless, it had a significant effect on the distribution of N, K, and DM in the plant (Figure 2). In the $F_{1.5NK}$ treatment, the plant vegetative part removed more N, K, and DM than F_{DUW} and F_{NK} , which was related to a lower exportation by the fruit as a consequence of the less productive efficiency that this treatment presents.

Conclusions

With regard to yield, nutrient uptake, and productive efficiencies, the F_{DUW} and F_{NK} treatments showed the best response. Nevertheless, the NK extraction of F_{DUW} was much greater than that applied by wastewater, which seems to indicate that crops are quite efficient in the N and K uptake from the soil without negative effect on the yield. However, the addition of 81N–84K kg ha⁻¹ by fertigation is necessary to cover the needs of the crop and wastewater content to assure the maintenance of the soil fertility level and to reduce costs and negative effect on the environment through salinity accumulation and groundwater contamination, especially through leaching.

Acknowledgments

This work has been financed by the D.G.I.A. Consejería de Agricultura y Pesca, Junta of Andalucía, Spain (Project PIA-12-01-3).

References

- Adler, P. R., G. E. Wilcox, and A. H. Markhart. 1996. NH_4^+ decreases mustmelon root system hydraulic conductivity. *Journal of Plant Nutrition* 19:1395–1403.
- Alam, S. M. 1994. Nutrient uptake by plants under stress condition. In *Handbook of plant and crop stress*, ed. M. Pessarakli, 227–243. New York: Marcel Dekker.
- AOAC. 1995. *Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists*, 16th ed. Washington, D.C.: AOAC.
- Bertsch, F., J. Carlos Hernandez, F. Arguedas, and M. Acosta, M. 2003. Nutrient absorption curves in two red common bean varieties, Bribri and Sacapobres. *Agronomía Costarricense* 27:75–81.
- Consejería de Agricultura y Pesca (CAP). 2008. *Estadística de producciones agrarias*. Available at <http://www.cap.junta-andalucia.es/agriculturaypesca>
- Claussen, W., and F. Lenz. 1999. Effect of ammonium or nitrate nutrition on net photosynthesis, growth, and activity of the enzymes nitrate reductase and glutamine synthetase in blueberry, raspberry, and strawberry. *Plant and Soil* 208:95–102.
- Feil, B. 1994. Growth and ammonium: Nitrate uptake ratio of spring wheat cultivars under homogeneous and spatially separated supply of ammonium and nitrate. *Journal of Plant Nutrition* 17:717–728.
- Guo, S., R. Kaldenhoff, N. Uehlein, B. Sattelmacher, and H. Brueck. 2007. Relationship between water and nitrogen uptake in nitrate- and ammonium-supplied *Phaseolus vulgaris* L. plants. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 170:73–80.
- Lima, E. V., C. A. Aragão, O. Magalhães, R. Tanaka, and H. Grassi. 2001. Adubação NK no desenvolvimento e na concentração de macronutrientes no florescimento do feijoeiro. *Scientia Agricola* 58 (1): 125–129.
- López-Gálvez, J., M. M. Téllez, and F. Bretones. 1991. Efectos de la fertilización nitrogenada sobre la cosecha y la extracción de macronutrientes en un cultivo de judía de enrame. *Actas II Congreso Nacional de Fertilización (SECH)*. Almería, Spain: FIAPA.
- Maas, E. V., and G. J. Hoffman. 1977. Crop salt tolerance—Current assessment. *ASCE Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 103:115–134.
- Pill, W. G., and V. N. Lambeth. 1977. Effect of NH_4 and NO_3 nutrition with and without pH adjustment on tomato growth, ion composition, and water relations. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 102:78–81.
- Raab, T. K., and N. Terry. 1995. Carbon, nitrogen, and nutrient interactions in *Beta vulgaris* L. as influenced by nitrogen source, NO_3^- versus NH_4^+ . *Plant Physiology* 107:575–584.
- Ramakrishna, K., K. S. Krishnappa, and P. Umamaheswarappa. 2002. Dry-matter production, nutrient accumulation, and uptake of primary nutrients in French bean (*Phaseolus vulgaris* L.) as affected by genotypes, spacings, and fertilizer levels. *South Indian Horticulture* 50:105–112.
- Ramos, J. J., C. Gil, and R. Boluda. 2002. Estudio de las características de los antrosolos cumúlicos en los invernaderos de la comarca del poniente almeriense: Influencia de las prácticas agrícolas sobre los cambios de sus propiedades. *Edafología* 9 (2): 129–142.
- Segura, M. L. 1995. *Fertilización de cultivos hortícolas en condiciones salinas con sistema enarenado y sustratos alternativos*. PhD thesis, Universidad Autónoma de Madrid.
- Segura, M. L., J. I. Contreras, R. Salinas, and M. T. Lao. 2009. Influence of salinity and fertilization level on the nutrient distribution in tomato plants under polyethylene greenhouse in the Mediterranean area. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 40:498–513.
- Segura, M. L., R. Granados, J. I. Contreras, E. Martín, and J. M. Rodríguez. 2006. Greenhouse managements of the potassium fertilization of a green bean crop. *Acta Horticulturae* 700:145–148.

- Segura, M. L., R. Moreno, J. Pérez, and J. Moreno. 2001. Effects of wastewater irrigation on melon growth under greenhouse conditions. *Acta Horticulturae* 559:347–352.
- United States Salinity Laboratory Staff. 1954. *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils* (U.S. Department of Agriculture Handbook no. 60). Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office.
- Valdez, M. T., T. Ito, Y. Shinohara, and T. Maruo. 2002. Effects of nutrient solution levels on the growth, yield, and mineral contents in hydroponically grown bush snap bean. *Environment Control in Biology* 40:167–175.
- Walch-Liu, P., G. Neumann, F. Bangerth, and C. Engels. 2000. Rapid effects of nitrogen form on lead morphogenesis in tobacco. *Journal of Experimental Botany* 51:227–237.

CAPITULO X

Discusión General

10.1. EFECTO DE LA FERTIRRIGACIÓN

10.1.1. Producción de fruto

El efecto de la concentración de nutrientes sobre la producción de fruto en los cultivos hortícolas ha sido estudiado por diversos autores (Gratieri et al., 2013; Catellanos et al., 2010, 2012; Song et al., 2010; Demiral y Köseoglu, 2005; Contreras et al., 2007; López-Gálvez et al., 1991; Gul et al., 2011; Yasuor et al., 2013). Fundamentalmente se relaciona un aumento de la producción de fruto con un incremento de la dosis de nitrógeno (Buzetti et al., 1993; Coelho et al., 2001; Papadopoulos, 1987; Warner et al., 2004; Lima et al., 2007; Kuscu et al., 2014) debido a que el N es el nutriente que tiene más influencia sobre la producción y exportación de citoquininas (Marchner, 1995) y la función fotosintética (Grindlay, 1997). Sin embargo, en cultivos con gran demanda de K, como sucede con los cultivos hortícolas de invernadero, la producción de fruto también está estrechamente relacionada con la concentración de K aplicada, consiguiéndose, con una adecuada nutrición potásica, un aumento de los rendimientos y el tamaño de fruto (Hartz et al., 2005; Geraldson, 1985; Kanai et al., 2007; Contreras et al., 2007; Segura et al., 2009a; Lester et al., 2010; Contreras et al., 2014a; Segura y Contreras, 2014).

En línea con las tendencias actuales de sostenibilidad de los sistemas productivos, la optimización de las dosis de nutrientes para cada sistema de producción, en unas condiciones específicas de desarrollo, puede conseguir una reducción del aporte de nutrientes sin producir efectos negativos en la producción de fruto (Demiral y Köseoglu, 2005; He et al., 2007; Muñoz et al., 2008; Çolpan et al., 2013).

Las experiencias desarrolladas en esta Tesis, han demostrado que un aumento de la concentración NPK o NK incrementa los rendimientos de melón, tomate y pimiento, apreciándose una respuesta distinta del cultivo de judía.

El cultivo de melón mostró, en los dos ensayos, una respuesta creciente en la producción de fruto al aumentar la cantidad de nutrientes aplicados en fertirrigación, si bien la respuesta no fue lineal, respondió a una función polinómica, de forma que la pendiente de la curva fue disminuyendo cuando se incrementaba la dosis de NK aportada. La mayor producción comercial (61 t ha^{-1}) se obtuvo con dosis de 396 kg N

ha⁻¹ y 781 kg K ha⁻¹ (tratamiento F₅), pero teniendo en cuenta la eficiencia agronómica (apartado 10.6.1.1.), que relaciona la producción con los nutrientes aportados, el tratamiento que aplicó 275 kg N ha⁻¹ y 533 kg K ha⁻¹ (F₄), aunque obtuvo una producción comercial ligeramente inferior (54,3 t ha⁻¹), fue el mejor, al aumentar la producción de fruto por unidad de fertilizante aplicado de 154 a 198 kg de fruto kg⁻¹ de N aplicado, y de 78 a 102 kg de fruto kg⁻¹ de K. Castellanos et al. (2012), en cultivo de melón, obtuvieron la mayor producción de fruto con dosis de 112 kg N ha⁻¹ a 148 kg N ha⁻¹ según año, registrando mermas en la producción al disminuir el aporte de N. Las producciones obtenidas por estos autores (45-52 t ha⁻¹) fueron ligeramente inferiores a las obtenidas en las experiencias desarrolladas en la Tesis, si bien la diferencia en las dosis de N aplicadas para la mejor respuesta productiva puede estar asociada a la concentración de nutrientes presentes en el suelo, presentando los suelos en los que estos autores han desarrollado las experiencias unos niveles de N y K muy superiores (1100 frente a 60 mg N kg⁻¹ y 350 frente a 168 mg K kg⁻¹). Por otra parte, Demiral y Köseoglu (2005) encontraron que distintas dosis de K (de 200 a 600 mg L⁻¹) no tenían efecto sobre el rendimiento del melón, probablemente como resultado del alto contenido de K del suelo del invernadero. En los experimentos de la Tesis, el nivel de K en el suelo fue bajo (168 mg kg⁻¹) y como se ha comentado anteriormente, la respuesta al aporte de nutrientes mostró un incremento de producción muy claro. En ensayos de fertilización, los niveles de nutrientes presentes en suelo tienen una gran influencia en los resultados obtenidos, ya que los cultivos hortícolas parecen tener una gran capacidad para absorber nutrientes del suelo, como lo evidencian numerosos estudios (Segura, 1995; Contreras et al., 2012b; Segura et al., 2012; Yasour et al., 2013).

Coincidiendo con los resultados obtenidos en melón, en el cultivo de tomate un incremento de la fertirrigación NPK produjo un aumento de la producción de fruto que no se acogió a una función lineal, ya que la aplicación de la dosis de 184 kg N ha⁻¹, 27 kg P ha⁻¹ y 224 kg K ha⁻¹ (tratamiento F₁) alcanzó un rendimiento de 84,7 t ha⁻¹, el doble (tratamiento F₂: 367 kg N ha⁻¹, 54 kg P ha⁻¹ y 448 kg K ha⁻¹) obtuvo 117,3 t ha⁻¹ y una dosis cuatro veces mayor (tratamiento F₃: 734 kg ha⁻¹ de N, 108 kg ha⁻¹ de P y 898 kg ha⁻¹ de K) obtuvo un rendimiento de 128,6 t ha⁻¹, dibujando una función que disminuye la pendiente con el incremento de las dosis NPK. La mayor producción comercial (128,6 t ha⁻¹) se obtuvo con la mayor dosis (tratamiento F₃). Si se considera la

eficiencia agronómica (apartado 10.6.1.1), el tratamiento que mejor respuesta presentó fue el F₂ que redujo un 9% la producción (117,3 t ha⁻¹) con respecto a F₃ y aplicó el 50% menos de fertilizantes. La producción de fruto por nutriente aplicado, aumentó en este tratamiento de 175 a 320 kg de fruto por kg de N, de 1190 a 2172 kg de fruto por kg de P aplicado y de 144 a 262 kg de fruto por kg de K aplicado.

En el experimento desarrollado sobre cultivo de pimiento, la supresión del aporte de fertilizantes en fertirrigación redujo los rendimientos, si bien cuando se utilizó agua regenerada (aporte de 47 kg N ha⁻¹ y 23 kg K ha⁻¹) los rendimientos fueron similares a los obtenidos con dosis de 125 kg N ha⁻¹ y 193 kg K ha⁻¹ (tratamiento N₁K₁). El aumento de la dosis de N o de K o ambas (tratamiento N_{1,5}K₁, N₁K_{1,5} y N_{1,5}K_{1,5}) produjo un aumento de los rendimientos en torno al 23% respecto a N₁K₁. Estos resultados coinciden con lo observado por Yasour et al. (2013) y Bar Tal et al. (2001) que encontraron una respuesta positiva en producción al incrementar la dosis de N en fertirrigación. Yasour et al. (2013) establecieron un valor de 7,3 mM de N en la disolución de fertirrigación como óptima para obtener una buena producción de pimiento y maximizar la absorción de N por el cultivo. Por su parte, Bar Tal et al. (2001) establecieron una concentración de 9,3 mM de N como valor óptimo para obtener un buen rendimiento de fruto de pimiento desarrollado en invernadero y en clima mediterráneo. Esta concentración es similar a la aplicada en el tratamiento N₁K_{1,5} que obtuvo una de las mayores producciones (53,6 t ha⁻¹) y cuya concentración media fue de 9,8 mM de N. Similares resultados obtuvieron Walid-Qawasmi et al. (1999), los cuales consiguieron las mayores producciones de pimiento con dosis de 125 kg N ha⁻¹. Los rendimientos obtenidos con la aplicación de 125 kg N ha⁻¹ y 193 kg K ha⁻¹ (dosis N₁K₁) fueron similares a los obtenidos en el mismo cultivo en condiciones de desarrollo similares (Contreras et al. 2006) y ligeramente inferiores a los rendimientos normales obtenidos en el área de producción (63 t ha⁻¹) (CAP, 2009), probablemente debido a que el ciclo desarrollado fue más corto.

En cultivo de judía verde, el aumento de la dosis de NK hasta 204 kg N ha⁻¹ y 196 kg K ha⁻¹ (tratamiento F_{1,5}NK) originó, además de una acumulación de sales en el suelo (apartado 10.1.6), un descenso de la producción de fruto del 19% debido a una reducción del número de frutos comerciales (20%). Este efecto sobre el rendimiento podría ser explicado por la baja tolerancia del cultivo a la salinidad. La judía verde está

clasificada como sensible a la salinidad (Maas y Hoffman, 1977), disminuyendo el rendimiento un 10% a CE del agua de riego de $1,0 \text{ dS m}^{-1}$. La CE media de la disolución de fertirrigación para este tratamiento fue mayor ($3,4 \text{ dS m}^{-1}$). Es importante destacar que la producción de cultivo no se redujo al suprimir el aporte de fertilizantes. La concentración de nutrientes presentes en el agua regenerada (que supuso un aporte en el ciclo de 30 kg N ha^{-1} y 31 kg K ha^{-1}) fue suficiente para igualar en producción al tratamiento que aplicó 136 kg N ha^{-1} y 131 kg K ha^{-1} (F_{NK}). Por otra parte, las producciones de judía obtenidas fueron similares a las del área de producción ($1,1 \text{ kg m}^{-2}$) (CAP, 2008). López-Gálvez et al. (1991) estimaron que los rangos óptimos de NK para obtener la máxima producción de judía verde se situaban entre $116\text{-}138 \text{ kg N ha}^{-1}$ y $206\text{-}210 \text{ kg K ha}^{-1}$ para condiciones similares de desarrollo. Los resultados obtenidos en la Tesis mostraron que, en las condiciones de desarrollo de la experiencia, la aplicación de cantidades inferiores de K (136 kg N ha^{-1} y 131 kg K ha^{-1}) fueron suficientes para obtener una buena producción. La mayor eficiencia agronómica (apartado 10.1.6.1) en el cultivo de judía se obtuvo con el riego con agua regenerada sin aporte de fertilizantes, que produjo 11 t ha^{-1} . Hay que destacar, que el cultivo se desarrolló en un suelo con unos niveles normales de N y K que contribuyeron a la nutrición del cultivo, demostrando la capacidad que tiene la judía de absorber nutrientes del suelo.

Como resumen, a excepción del cultivo de judía, el resto de cultivos (tomate, melón y pimiento) mostraron una respuesta positiva en producción al incremento de la dosis NK o NPK, acogiéndose esta respuesta a una función que dibuja una curva donde la pendiente disminuye con el incremento de la dosis de nutrientes, posibilitando determinar un punto óptimo de rendimiento económico basado en la producción y la eficiencia agronómica de nutrientes. La diferenciación en el comportamiento observada en el cultivo de judía podría estar relacionada con la mayor sensibilidad del cultivo a la salinidad, ya que el valor de la CE media de la disolución de fertirrigación del tratamiento que redujo la producción ($F_{1,5\text{NK}}$) se situó en $3,4 \text{ dS m}^{-1}$, valor muy superior a la tolerancia umbral establecida para el cultivo (Ayers y Westcot, 1985)

10.1.2. Calidad de fruto

La calidad del fruto está influenciada por factores genéticos, medio ambientales y culturales, en los cuales se incluye la nutrición de la planta (Dorais et al., 2001). En los cultivos de tomate y pimiento determinados indicadores físico-químicos y químicos del fruto pueden ser afectados por la concentración de nutrientes de la disolución de fertirrigación (Wuzhong, 2002; Warner et al., 2004; Rubio et al., 2010). De todos los nutrientes esenciales para la planta, el K es el que absorben en mayor cantidad dichos cultivos, siendo además, el nutriente clave para obtener una producción de calidad (Mengel y Kikby, 2001; Marscher, 1995).

En las condiciones del experimento de tomate, la dosis NPK no afectó la concentración de sólidos solubles totales (°Brix) ni el pH del jugo del fruto, pero sí aumentó la firmeza y la acidez titulable en los tratamientos de mayor aporte NPK (F₂: 367 kg ha⁻¹ de N, 54 kg ha⁻¹ de P y 448 kg ha⁻¹ de K y F₃ que aplicó el doble de nutrientes que F₂). El incremento que se registró en la acidez de los frutos parece estar más relacionado con el aporte de N y K que con el P. Davies y Winsor (1967) y Thakur et al. (1996) obtuvieron una relación positiva entre la concentración de N y K aplicada y la acidez del fruto. Por otra parte Colpan et al. (2013) encontraron un efecto positivo en la firmeza con el incremento de la concentración de K, pero al igual que lo obtenido en el experimento de la Tesis, no se obtuvieron incrementos del contenido de sólidos solubles totales entre dosis de 33 y 133 kg K ha⁻¹. Respecto al P, Mahakum et al. (1979) encontraron una correlación negativa entre la dosis de elemento y la acidez titulable del fruto, efecto que no se han apreciado en nuestra experiencia.

El porcentaje de materia seca del fruto de tomate, firmeza y contenido total de sólidos solubles (°Brix) aumentaron durante el periodo de recolección, independientemente del nivel de fertilización. Así, los frutos recolectados en la última recolección presentaron mayor porcentaje de materia seca, más firmeza y mayor contenido en sólidos solubles totales que los frutos recolectados en la primera recolección. Estos efectos podrían estar asociados al incremento de la salinidad en el suelo con el avance del ciclo, pero al repetirse en todos los tratamientos, incluidos los deficitarios en nutrientes con baja CE de la solución de fertirrigación, es más probable que esté asociado a las condiciones climáticas o al propio nivel de desarrollo. A medida

que va avanzando el ciclo de cultivo, la radiación es mayor, con lo cual la temperatura también, produciendo una bajada en la humedad relativa. Según Bertin et al. (2000) en condiciones de baja humedad relativa se acumula más materia seca en el fruto.

En el cultivo de pimiento, los tratamientos sin aporte de NK obtuvieron unos valores de pH, acidez titulable, firmeza, y sólidos solubles totales en fruto, similares a los fertirrigados con NK. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Del Amor et al. (2008) y Yasour et al. (2013), quienes no encontraron diferencias en la calidad de fruto de pimiento por efecto de la concentración de N aplicada.

En general, el pH, acidez titulable, firmeza y sólidos solubles totales del fruto de pimiento no variaron durante el periodo de recolección para los frutos recolectados en verde, resultados que también coinciden con lo obtenido por Yasour et al. (2013). Los valores registrados en el jugo del fruto se situaron en torno a 5,5 para el pH, 19 mmolc L⁻¹ para la acidez titulable y 5,0 °Brix para los sólidos solubles totales. En la tercera recolección, en la cual se recolectaron frutos en rojo y en verde, se aprecian diferencias en los parámetros organolépticos dependiendo del estado de maduración del fruto. En comparación con los frutos recolectados en verde, los frutos en rojo obtuvieron menor pH (4,8 vs 5,6), mayor acidez titulable (60 mmolc L⁻¹ vs 20 mmolc L⁻¹), menor firmeza (3,8 kg frente a 4,4 kg), y mayor contenido de sólidos solubles totales (8,0 vs 5,0 °Brix). Estos resultados coinciden con los obtenidos por Niklis et al. (2002), que observaron que tanto la acidez como los sólidos solubles totales incrementan con la maduración del fruto. Los sólidos solubles totales registrados en el fruto rojo son similares a los valores obtenidos por Eissa et al. (2007) y más elevados que el rango determinado por Urrestarazu (2004), cifrado entre 4,5 y 7 °Brix para cultivo de pimiento rojo tipo California. Los valores de firmeza obtenidos fueron algo inferiores a los indicados por Urrestarazu (2004), debido probablemente al mayor estado de madurez de los frutos recolectados en el ensayo de la Tesis, hecho que justificaría también el mayor contenido en sólidos solubles totales.

10.1.3. Producción de materia seca aérea de la planta

La dosis de fertilización influyó en la producción de materia seca aérea de los cultivos de melón, tomate y pimiento, no siendo así en la judía. Numerosos estudios de nutrición han descrito incrementos de producción de materia seca al aumentar la dosis

nitrogenada (Kirkby y Knight, 1977; Ruiz y Romero, 1998; Mengel et al., 2001; Elia y Conversa, 2012), llegando a alcanzar un valor umbral, a partir del cual, no se detectan efectos sobre el cultivo (Chen et al., 2009; Castellanos et al., 2010). Efectos similares se han determinado para el fósforo (Mohammad et al., 1998) y el potasio (Al-Karaki, 2000). Si bien, dependiendo del cultivo y de las condiciones de desarrollo del mismo, la respuesta puede diferir, de ahí la importancia de estudiar el efecto de la concentración de la disolución de fertirrigación para cada cultivo e *in situ*.

En las condiciones de desarrollo de las experiencias de la Tesis, la producción de materia seca registró un patrón similar al obtenido para la producción de fruto en los cultivos de melón, tomate y pimiento, aumentando con el incremento de la dosis NK o NPK aportada. En el cultivo de judía, el comportamiento fue diferente, no existiendo diferencias en la producción de materia seca, sin embargo, como se ha reflejado anteriormente (apartado 10.1.1), se registró un descenso de la producción de fruto en el tratamiento de mayor dosis ($F_{1,5NK}$). Esto se debe a la reducción de la materia seca destinada a fruto y el aumento de la materia seca destinada a la parte vegetativa, compensando así la materia seca total de la planta (Anexo 1, Tabla A1.5). Esta respuesta del cultivo ha sido documentada por Ruiz y Romero, (1998), Mengel et al. (2001), y Elia y Conversa (2012), los cuales coinciden e indican que dosis excesivas de N a menudo conducen a un aumento del crecimiento vegetativo en detrimento del desarrollo de la raíz o del fruto.

10.1.4. Absorción total de nutrientes y sodio por la parte aérea de la planta

La dosis de fertilización afectó la absorción de nutrientes por la planta, aumentándola al incrementar la dosis NK o NPK en fertirrigación. Este incremento de absorción como respuesta a la dosis de aplicación está ampliamente documentado (Kirkby y Knight, 1977; Chen et al., 2009; Castellanos et al., 2010; Yasour et al., 2013). Al igual que lo ocurrido para la producción de materia seca de la planta, la respuesta de absorción de N de los cultivos al incremento de las dosis de N aplicadas sigue una función no lineal, de forma que incrementan la producción hasta un valor umbral, a partir del cual, un aumento del aporte de N no repercuten en una mayor extracción del elemento por la planta (Kirkby y Knight, 1977; Chen et al., 2009; Castellanos et al., 2010, 2012). La respuesta de absorción de nutrientes por la planta, al igual que la

producción de materia seca, no solo depende de la fertilización realizada, también de otros factores entre los que se incluyen el cultivo y las condiciones de desarrollo del mismo.

En las condiciones de desarrollo de las experiencias de la Tesis, todos los cultivos ensayados incrementaron la absorción de N y K al incrementar la dosis de estos nutrientes en fertirrigación, si bien la causa del incremento fue diferente dependiendo del cultivo. El incremento de las extracciones de N y K de la parte aérea de la planta en los cultivos de melón y tomate, estuvo asociado a la mayor producción de materia seca y también al incremento de la concentración tisular de estos nutrientes (Anexo 1, Tablas A1.1, A1.2 y A1.3). En el cultivo de pimiento, se debió exclusivamente a una mayor producción de materia seca, puesto que no hubo diferencias significativas en la concentración de nutrientes en el tejido de la planta (Anexo 1, Tabla A1.4). Sin embargo, en judía, el incremento de la absorción estuvo asociado a un aumento de la concentración de nutriente en los tejidos de los diferentes órganos de la planta (hoja, tallo y fruto) (Anexo 1, Tabla A1.5).

Los resultados obtenidos en la Tesis permitieron establecer una relación polinómica entre la producción de fruto y la extracción de N y K para el cultivo de melón, corroborando la estrecha relación que existe entre la absorción de estos elementos y el rendimiento. De estas relaciones se pudieron determinar unas extracciones óptimas para maximizar la producción (66 t ha^{-1}), cifrándose en 280 kg N ha^{-1} y 470 kg K ha^{-1} . La extracción de N y K obtenida fue ligeramente superior a la determinada por Rincón et al. (1998) que obtuvieron para una producción comercial de $53,2 \text{ t ha}^{-1}$ extracciones de 200 kg N ha^{-1} de y 413 kg K ha^{-1} . Independientemente de la dosis aplicada en fertirrigación, en todos los tratamientos estudiados la absorción total de K por la planta fue mayor a la de N coincidiendo con los resultados de Rincón et al. (1998).

En el cultivo de tomate, la absorción de N, P, K, Ca, Mg, y Na aumentó linealmente con el incremento de la concentración NPK. La absorción de nutrientes (N, P y K) también estuvo linealmente relacionada con la producción de fruto, con unas extracciones de 401 kg N ha^{-1} , 76 kg P ha^{-1} , 541 kg K ha^{-1} , $323 \text{ kg Ca ha}^{-1}$ y $124 \text{ kg Mg ha}^{-1}$ para una producción comercial de 129 t ha^{-1} . El orden de absorción total de

nutrientes por la planta fue $K > N > Ca > Mg > P$, independientemente del tratamiento de fertirrigación. Magán (2005) obtuvo en cultivo de tomate en sistema sin suelo y recirculación, el mismo orden de absorción total de nutrientes a excepción del P, que fue mayor que el Mg.

En el cultivo de pimiento, la dosis de 188 kg N ha^{-1} y 290 kg K ha^{-1} (tratamiento $N_{1,5}K_{1,5}$) presentó la mayor absorción de N y K sin afectar la concentración de estos nutrientes en el tejido (% s.m.s.) (Anexo 1, Tabla A1.3), fue resultado de la mayor producción de materia seca de la planta. El hecho que la concentración de nutrientes en el tejido de la planta no fuera modificada por el tratamiento de fertirrigación y sí lo fuera la producción de fruto y de materia seca indica que la concentración de nutrientes del tejido vegetal (% s.m.s.) no es indicativa del rendimiento potencial del cultivo, coincidiendo con los resultados obtenidos por Kirkby y Knight (1977), Martí y Mills (1991) y Al-Karaki (2000). El cultivo respondió al incremento de las dosis de NK con un aumento de la extracción del resto de nutrientes (P, Ca y Mg) si bien al igual que lo ocurrido con el N y K, la concentración en el tejido (% s.m.s.) no fue modificada, se debió a una mayor producción de materia seca. La absorción total de nutrientes por la planta para la mayor producción de fruto osciló entre $234 \text{ y } 315 \text{ kg N ha}^{-1}$, $96 \text{ y } 114 \text{ kg P ha}^{-1}$, $262 \text{ a } 286 \text{ kg K ha}^{-1}$, $85 \text{ a } 93 \text{ kg Ca ha}^{-1}$, y entre $42 \text{ y } 47 \text{ kg Mg ha}^{-1}$. La oscilación registrada en las extracciones de nutrientes, sin producir efecto en la producción de fruto, pone de manifiesto un consumo de lujo en el tratamiento de mayor extracción de NPK que coincidió con el de mayor aporte ($N_{1,5}K_{1,5}$). La extracción de nutriente por unidad de producción en este tratamiento ($N_{1,5}K_{1,5}$) se situó en 38 kg N , 2 kg P y 51 kg K t^{-1} de fruto producido, y en los otros tratamientos ($N_1K_{1,5}$ y $N_{1,5}K_1$) se redujo a 35 kg N , 2 kg P y 50 kg K t^{-1} de producción. Siendo por tanto los tratamientos $N_1K_{1,5}$ y $N_{1,5}K_1$ más eficientes. Fontes et al. (2005) determinaron las curvas de absorción de nutrientes para esta especie y desarrollaron un modelo para estimar la dosis de N y K óptima en condiciones de invernadero, obteniendo valores de producción y absorción de N y K algo inferiores, a los alcanzados en este experimento (producción: 52 t ha^{-1} , absorción: 193 kg N ha^{-1} y 247 kg K ha^{-1}).

El periodo de mayor absorción de nutrientes para el pimiento fue la fase de recolección, representando del 57 al 62% del N total extraído por la planta y del 57 al 64% del K total extraído, según tratamiento. Estos resultados son similares a los

obtenidos para cultivo de melón y tomate desarrollados bajo las mismas condiciones del ensayo (Segura y Contreras, 2014; Contreras et al., 2014a) donde el periodo de recolección representó el 50% de la extracción total de N y K.

Al igual que lo determinado en tomate, la absorción de nutrientes en el cultivo de pimiento siguió el mismo orden en todos los tratamientos: $K > N > Ca > Mg > P$, similar a lo registrado por Fontes et al. (2005). Sin embargo, Noh-Medina et al. (2010) encontraron un orden de absorción diferente, siendo mayor la absorción de N que de K ($N > K > Ca > Mg > P$). Esta discordancia se puede deber a la variedad de pimiento estudiado y las distintas condiciones del sistema de cultivo (aire libre).

En el cultivo de judía, la dosis NK no afectó la absorción total de P, Ca, y Mg por la planta. Sin embargo, la absorción de N y K si estuvo relacionada con el tratamiento fertilizante, aumentando al adicionar dichos nutrientes al agua regenerada. Esta mayor absorción de N y K estuvo asociada a la mayor concentración de estos nutrientes en el tejido de la planta (Anexo 1, Tabla 5). Similar a lo observado en el cultivo de pimiento, el hecho de que aumente la extracción de nutrientes (N, K) sin aumentar la producción de fruto (apartado 9.1.1) indica un consumo de lujo de esta especie en los tratamientos con mayor aporte de fertilizantes. La extracción de N, P y K realizada por la planta por unidad de producción obtenida aumentó con el incremento de la concentración NK y osciló entre 68-94 kg N, 6,4-8,7 kg P y 60-103 kg K t⁻¹ de fruto comercial producido, según tratamiento, cifrándose la absorción total de nutrientes por la planta en 81 kg N-8,4 kg P-87 kg K ha⁻¹, valores inferiores en lo que respecta al N y K, a los obtenidos por Ramakrishna et al. (2002) y similares en P (119 kg N-8,3 kg P-125 kg K ha⁻¹), e inferiores también a los obtenidos por Bertsch et al. (2003) (191 kg N-25 kg P-189 kg K ha⁻¹). Estas diferencias podrían justificarse por la diferentes condiciones de cultivo (variedad, clima y densidad de plantación) y la mayor producción obtenida por dichos autores (29 frente a 11 t ha⁻¹). El orden de absorción en cuanto a cantidad fue $K > N > P$ coincidiendo con lo obtenido por Pegoraro et al. (2013) y Ramakrishna et al. (2002).

10.1.5. Distribución de materia seca, nutrientes y sodio en la planta

Las distribuciones porcentuales de materia seca y nutrientes (N, P, K, Ca y Mg) en cada órgano de la planta proporcionan información de la respuesta fisiológica de la

misma a la fertilización aplicada. En la mayoría de los cultivos ensayados, la proporción de materia seca, N y K destinada a fruto sufre una reducción a dosis elevadas de NK o NPK.

En melón, el mayor nivel de NK aplicado (F_5) obtuvo una reducción en el porcentaje de materia seca, N y K destinado a fruto en comparación con los tratamientos de inferiores dosis NK, destinándose mayor porcentaje a la parte vegetativa. Destacar, que del total de materia seca producida y N y K extraído por la parte aérea de la planta de melón la mayor proporción es destinada a fruto, independientemente de la dosis NK aplicada. Los porcentajes obtenidos por el fruto en el primer ciclo oscilaron según tratamiento, entre el 51% y el 48% para la materia seca, entre 58% y 55% para el N, y entre 54% y 45% para el K. En el segundo ciclo, fueron aún mayores y oscilaron según tratamiento entre el 83% y 77% para la materia seca, entre 61% y 55% para el N, y entre 74% y 65% para el K.

En el cultivo de tomate, la distribución de N en la planta no fue afectada por la dosis NK pero si lo fue el K, reduciendo el porcentaje de este elemento destinado al fruto a favor de la parte vegetativa (hoja y tallo) con el aumento de la dosis NPK aplicada en fertirrigación. Respecto al efecto de la dosis NPK sobre la compartimentación de otros nutrientes, se apreció un efecto en la distribución de P, reduciendo el destinado a fruto y tallo a favor de la hoja con la mayor dosis NPK. Estos resultados demostraron la gran movilidad del P en de la planta, mostrando una posible retranslocación del nutriente pudiendo ser almacenado en las vacuolas de las hojas, como describe Raghothama y Karthikeyan (2005) y Zrenner et al. (2006), este efecto puede suceder cuando el nivel del elemento en fruto es adecuado. Al igual que lo observado en melón, el fruto de tomate fue el principal sumidero de nutrientes, presentando sobre el total extraído por la parte aérea de la planta un 43-59% para N, 34-50% para P, y 51-63% para el K, dependiendo de la dosis fertilizante aplicada. Estos valores son muy similares a los obtenidos por Magán (2005) para tomate desarrollado en cultivo sin suelo y recirculación (40% para el N, 35% para el P y 49% para el K). Por otra parte, Fisher et al. (2002) también en cultivo de tomate desarrollado en hidropónico coinciden en que el fruto es el principal sumidero de N y K, con porcentajes destinados a fruto similares a los determinados en el ensayo de la Tesis.

El patrón de distribución del Ca en la planta de tomate fue similar al Mg. La hoja fue el principal reservorio de Ca y Mg en todos los tratamientos, representando con respecto al total extraído por la planta, un 69-80% de Ca y 44-71% para el Mg, según tratamiento. El Ca acumulado por el fruto fue del orden del 10-16% del total extraído por la planta, según tratamiento. El porcentaje de Ca destinado a fruto fue mayor al determinado por Magán (2005) que obtuvo un 6%. El Mg presente en el fruto con respecto al total absorbido por la parte aérea representó entre 10-20% según el tratamiento. Por su parte Magán (2005) determinó un 20% de Mg compartimentado en el fruto. La tasa de evapotranspiración, en las condiciones locales del clima de Almería, tuvo una gran influencia sobre el flujo de los iones de Ca y Mg y su acumulación en la hoja. Se conoce que el Ca destinado a fruto es acumulado principalmente a través del xilema. Por otra parte, un alto déficit de presión de vapor (DPV) genera desequilibrio en la distribución de Ca entre las hojas y el fruto, provocando una disminución en la movilidad del Ca hacia el fruto como resultado de la menor tasa de transpiración de este órgano (Lao, 2002). Las hojas se utilizan generalmente para evaluar la presencia de Ca en la planta, pero el contenido en Ca de la hoja no está siempre correlacionado con el nivel de Ca en frutos (El-Gizawy y Adams 1986). La compartimentación de Na en la parte aérea de la planta de tomate estuvo influenciada por el nivel de fertilización, presentando la mayor dosis (tratamiento F_3) una reducción del porcentaje de Na destinado a fruto a favor de la hoja.

En pimiento, las dosis NK aplicadas en fertirrigación no afectaron el porcentaje de materia seca y nutrientes destinados a la parte generativa, si bien el tratamiento sin aporte de NK, regado exclusivamente con agua regenerada (F_{DUW}) redujo el porcentaje de materia seca y P destinado a fruto. En relación a la materia seca, el porcentaje acumulado en el fruto osciló entre un 43 y 50%, según tratamiento. El fruto fue el principal sumidero de nutrientes representando un 39-45% de N y 40-47% de K, según tratamiento. Comparando estos valores con los obtenidos en el ensayo de tomate, los resultados fueron ligeramente inferiores, presentando el cultivo de pimiento menor acumulación de materia seca y nutrientes en el fruto en condiciones de cultivo similares. Coincidiendo con lo observado en tomate, la hoja de pimiento fue el principal reservorio de Ca y Mg en todos los tratamientos, extrayendo el 69-73% de Ca y 57-61%

de Mg respecto al total, este resultado está asociado a la influencia de la alta transpiración en el transporte de calcio hacia la hoja.

En la experiencia desarrollada sobre judía, la distribución de P, Ca y Mg en la planta no fue afectada por la dosis NK. Sin embargo, el tratamiento fertilizante tuvo efecto en la distribución de N, K, y materia seca en la planta, siendo el tratamiento de mayor aporte de NK ($F_{1,5NK}$) el que mostró una menor compartimentación de N y K y materia seca en el fruto.

A diferencia de los otros cultivos, en la judía verde la parte vegetativa fue la de mayor consumo de nutrientes y producción de materia seca, presentando el fruto una compartimentación media-baja con valores del orden de 27-31% para materia seca, 32-39% para N, 40-45% para P, y 32-37 para K dependiendo del tratamiento. Estos resultados coinciden con los obtenidos por López-Gálvez et al. (1991), quienes determinaron que en la parte vegetativa del cultivo de judía verde se concentra la mayor acumulación de N y materia seca, obteniendo porcentajes similares de nutrientes destinados a fruto. Por tanto, el cultivo de judía presentó un menor porcentaje de nutrientes destinado a fruto con respecto al total absorbido por la planta en comparación con los cultivos de melón, tomate y pimiento. La hoja fue el mayor reservorio de N, Ca, Mg y el fruto el mayor sumidero de P y K, resultados coincidentes con los obtenidos por Valdez et al. (2002).

10.1.6. Eficiencia de uso de nutrientes

La eficiencia de uso de nutrientes está influenciada por la cantidad de nutriente aplicado en relación a diversos parámetros del sistema productivo (Dobermann, 2007; Giuffrida y Leonardi, 2012). La eficiencia en el uso del nitrógeno y de otros nutrientes se puede calcular de diferentes formas (Fageria y Baligar, 2005; Van Eerd y O'Reilly, 2009). Moll et al. (1982) indican que para conseguir una buena eficiencia en la absorción y utilización de N para la producción de cereales de grano es necesario que los procesos asociados con la absorción, translocación, asimilación y redistribución del N funcionen eficazmente. Teniendo en cuenta estos aspectos del uso del N, las definiciones de la eficiencia del uso del N u otro nutriente pueden ser agrupadas o clasificadas como eficiencia agronómica (EA), eficiencia medioambiental (EMA), eficiencia de biomasa (EB), eficiencia de rendimiento (ER) y eficiencia productiva (EP)

(Contreras et al., 2013b; Yasour et al., 2013; Fageria, 2014). Las eficiencias determinadas en los experimentos de la Tesis se recogen en el Anexo 2, correspondiendo la Tabla A2.1 y A2.2 al cultivo de melón, la Tabla A2.3 al cultivo de tomate, la Tabla A2.4 al pimiento y la Tabla A2.5 al cultivo de judía verde. A continuación se discuten las eficiencias calculadas.

10.1.6.1. Eficiencia agronómica

Se define EA de un nutriente como la relación entre la producción obtenida y el nutriente aplicado (Yasour et al., 2013; Fageria, 2014). Esta eficiencia es la que mayor interés presenta para el productor, ya que el objetivo principal del mismo es reducir al máximo los insumos de fertilizantes por unidad de producción. En los experimentos desarrollados en la Tesis, la EA varió en función del cultivo y de la cantidad de nutriente aplicado. En general, y coincidiendo con lo descrito en bibliografía (Fageria y Baligar, 2001, 2003, 2005; Fageria et al., 2003, 2011; Fageria, 2014; Yasour et al., 2013) la EA es reducida cuando se incrementa la dosis del nutriente. En el cultivo de melón, es de destacar que los tratamientos que aplicaron: 220 kg N ha⁻¹ y 355 kg K ha⁻¹ (F₂), 275 kg N ha⁻¹ y 444 kg K ha⁻¹ (F₃) y 275 kg N ha⁻¹ y 533 kg K ha⁻¹ (F₄) presentaron similar EA para el N, situándose entre 184 y 198 kg kg⁻¹, si bien el incremento de la dosis a 396 kg N ha⁻¹ y 781 kg K ha⁻¹ (F₅) produjo un descenso considerable de la EA de este nutriente situándose en 154 kg kg⁻¹. La EA del K presentó un patrón similar, descendiendo a 78 kg kg⁻¹ en el tratamiento F₅ y situándose entre 102 y 121 kg kg⁻¹ en los tratamientos F₂, F₃ y F₄. Con los resultados obtenidos y aunando los resultados de producción de fruto, la dosis F₄ (275 kg N ha⁻¹ y 533 kg K ha⁻¹) fue la que mejor respuesta presentó, ya que redujo ligeramente la producción con respecto a F₅ pero aumentó considerablemente la EA.

En cultivo de tomate, la EA de N,P y K disminuyó linealmente con el incremento de la concentración del nutriente, coincidiendo con lo observado por Giuffrida y Leonardi (2012). Existió una gran diferencia en la EA de N, P y K entre los tratamientos, así la dosis F₂ (367 kg N ha⁻¹, 54 kg P ha⁻¹ y 448 kg K ha⁻¹) presentó una EA para el N de 320 kg kg⁻¹, reduciéndose prácticamente a la mitad (175 kg kg⁻¹) con el tratamiento F₃ en el que se aportó el doble de nutrientes. Un patrón similar se determinó para el P y el K, la dosis F₂ presentó una EA de 2172 kg kg⁻¹ y de 262 kg kg⁻¹ para el P

y K respectivamente. Considerando la producción de fruto obtenida en estos tratamientos y la EA de nutrientes, la dosis F_2 fue la que mejor respuesta obtuvo, ya que aumentó prácticamente al doble la EA de nutrientes (N, P y K), presentando solo un descenso del 9 % en la producción de fruto (apartado 10.1.1) y sin pérdida de la calidad organoléptica del fruto de tomate (apartado 10.1.2).

De forma similar a los resultados obtenidos en los cultivos de melón y tomate, la EA en pimiento estuvo directamente relacionada con la dosis de nutrientes. La dosis $N_1K_{1,5}$ (125 kg N ha^{-1} y 290 kg K ha^{-1}) obtuvo una EA de N de 431 kg kg^{-1} , que se redujo a 286 y 298 kg kg^{-1} en los tratamientos $N_{1,5}K_1$ y $N_{1,5}K_{1,5}$ respectivamente. Para el K, la dosis $N_{1,5}K_1$ presentó una EA de 278 kg kg^{-1} , reduciéndose a 186 y 193 kg kg^{-1} cuando se aplican las dosis $N_1K_{1,5}$ y $N_{1,5}K_{1,5}$ respectivamente. Las EA determinadas para el N fueron mayores a las obtenidas por Huez-López et al. (2011), los cuales obtuvieron una eficiencia de 166 kg kg^{-1} , debido posiblemente al tipo de pimiento. También fueron mayores a las obtenidas por Yasour et al. (2013) para una producción similar. Estas diferencias podrían estar asociadas al cultivar de pimiento, que como documentan Yasour et al. (2013) tiene influencia en el valor de la EA de N. Asociando la producción de fruto obtenida y la EA de N, el tratamiento $N_1K_{1,5}$ (125 kg N ha^{-1} y 290 kg K ha^{-1}) se presentó como el más adecuado, dado que no redujo la producción (apartado 10.1.1) y aumentó considerablemente la EA de N.

En el cultivo de judía, la EA también estuvo directamente relacionada con el aporte del nutriente, disminuyendo al incrementar la dosis. En los tratamientos fertilizados, el valor EA de N fue de 80 y 43 kg kg^{-1} para F_{NK} y $F_{1,5NK}$ respectivamente. Los valores de EA para el potasio se situaron en 83 y 45 kg kg^{-1} para las dosis F_{NK} y $F_{1,5NK}$. En este cultivo, el tratamiento sin aporte de fertilizantes (F_{DUW}) que solo se regó con agua regenerada presentó una EA de N y K muy elevada (223 y 456 kg kg^{-1} para N y K respectivamente). Aunando los rendimientos y la EA de nutrientes, el tratamiento F_{DUW} se presentó como el más adecuado, porque no redujo la producción (apartado 9.1.1) y aumentó considerablemente la EA de nutrientes respecto a F_{NK} y $F_{1,5NK}$.

10.1.6.2. Eficiencia medio ambiental

La eficiencia medio ambiental (EMA) de un nutriente se define como el porcentaje del nutriente absorbido por la planta respecto al total aplicado en

fertirrigación (Yasour et al., 2013). Es importante conseguir maximizar esta eficiencia ya que esto lleva implícito una reducción del impacto ambiental generado por la aplicación en exceso de fertilizantes, evitando así la posible contaminación del suelo y las aguas subterráneas por lixiviación. En los cultivos estudiados en la Tesis, la EMA varió en función del elemento, de la concentración aplicada y de la especie. En general, la EMA disminuyó al incrementar las dosis NK o NPK. Es de destacar que en algunos cultivos y tratamientos, la EMA para el N y K superó el 100%, lo que denota la capacidad que tienen los cultivos en las condiciones de desarrollo de los experimentos para absorber nutrientes del suelo, y asegurar una óptima producción.

El cultivo de melón fue el que menor EMA presentó, registrando un 63% para el N y 53% para el K en el tratamiento de mayor respuesta productiva (F_5) y un 65% para el N y 55% para K en el tratamiento de mayor eficiencia agronómica (F_4), sin presentar diferencias estadísticamente significativas en la EMA de N y K entre los dos tratamientos. Al igual que lo observado por Castellanos et al. (2010, 2012) la eficiencia de absorción de N en cultivo de melón disminuye con el incremento de la dosis nitrogenada.

En el cultivo de tomate, la EMA fue del 81% para el N y 96% para el K en el tratamiento de mayor eficiencia agronómica. Para el tratamiento de mayor producción, la EMA se redujo a un 55% para el N y un 60% para el K. Por tanto, el tratamiento de mayor EA (F_2) se ratifica como el mejor también desde el punto de vista de su EMA.

En el cultivo de pimiento, EMA para el N fue superior al 100% en todos los tratamientos (oscilando del 101 al 152%), y para el K se situó entre el 90 y 141%. Los valores de EMA estuvieron relacionados con la dosis de nutriente aplicado en fertirrigación, a mayor dosis menor EMA. El hecho de que las EMA superaran el 100% indica que el cultivo ha absorbido nitrógeno y potasio del suelo, corroborándose la capacidad que tienen los cultivos hortícolas de absorber nutrientes del suelo (Castellanos et al. 2012; Segura et al., 2012; Yasour et al., 2013).

En cultivo de judía, la EMA de nutrientes del tratamiento F_{NK} fue mayor que la obtenida por el tratamiento $F_{1,5NK}$, y se cifró en un 60% para el N y un 64% para el K. Sin embargo, la EMA para el N y el K en el tratamiento en el que no se aplicaron fertilizantes comerciales (F_{DUW}), únicamente los nutrientes aportados por el agua

regenerada, superó el 100%, lo que significa que la absorción realizada por el cultivo fue mayor a los aportes realizados por el agua. Esto demuestra, al igual que lo observado en el cultivo de pimiento, la capacidad que tiene el cultivo de judía en las condiciones de desarrollo de la experiencia para absorber N y K del suelo, y asegurar una óptima producción.

10.1.6.3. Eficiencia de biomasa

La eficiencia de biomasa (EB) se define como el peso seco total de la planta en relación al nutriente aplicado (Yasour et al., 2013). Al igual que la EA y la EMA estuvo afectada por la fertirrigación en todos los cultivos ensayados.

En cultivo de melón, la EB de N y K se redujo con las dosis más elevadas de nutrientes, obteniendo el tratamiento que presentó la mayor EA (F_4) una EB de 40 y 21 kg kg^{-1} para el N y K respectivamente.

En cultivo de tomate, la EB de N, P y K presentó una reducción lineal con el incremento de la dosis aplicada en fertirrigación. El tratamiento que mejor comportamiento presentó considerando la EA y producción de fruto (F_2), mostró valores de EB de 48, 329 y 40 kg kg^{-1} para el N, P y K respectivamente.

Para pimiento, la EB de N y K también estuvo influenciada por el nivel de nutrientes aplicados en fertirrigación. El incremento de la dosis provocó un descenso de la EB, coincidiendo con lo determinado por Yasour et al. (2013). Los valores de EB para el N fueron superiores a los obtenidos por Yasour et al. (2013) y del orden de 40-61 kg kg^{-1} dependiendo del aporte de N realizado. Los valores obtenidos de EB para el K oscilaron entre 26 y 39 kg kg^{-1} dependiendo del tratamiento fertilizante.

Coincidiendo con los demás cultivos, la judía la EB de N y K también estuvo influenciada por la fertilización realizada, disminuyendo con la dosis más elevada. El tratamiento de mayor producción (F_{DUW}) obtuvo valores de EB de 68 y 136 kg kg^{-1} para el N y K respectivamente.

10.1.6.4. Eficiencia de rendimiento

Se define la eficiencia de rendimiento (ER) de un nutriente como la relación entre la producción obtenida y el nutriente absorbido (Yasour et al., 2013).

En cultivo de melón la ER de N y K se redujo con el incremento de la dosis de nutriente, cifrándose para el tratamiento de mejor respuesta agronómica y medioambiental (F₄) en 308 y 188 kg kg⁻¹ para el N y K respectivamente.

Similar a lo ocurrido en el cultivo de melón, en tomate la ER de N y K se redujo con la dosis más elevada (F₃), si bien no se obtuvieron diferencias entre el resto de tratamientos. El tratamiento F₂ obtuvo valores de 407, 1909 y 273 kg kg⁻¹ para el N, P y K respectivamente.

En cultivo de pimiento la ER de N y K no estuvo influenciada por la dosis fertilizante, presentando todos los tratamientos valores similares que oscilaron entre 251-284 kg kg⁻¹ para el N y 180-207 kg kg⁻¹ para el K. Difiriendo con estos resultados, Yasour et al. (2013) encontraron un efecto de la dosis de N sobre la ER de N, reduciéndose la eficiencia al incrementar la dosis del nutriente. Además, observaron que el cultivar influye en la ER de N, presentando según cultivar una ER de N similar a la obtenida en el experimento de la Tesis (239 kg kg⁻¹) o una ER menor (193 kg kg⁻¹).

Resultados similares a los obtenidos en pimiento se obtuvieron en el cultivo de judía donde la ER de N y K tampoco estuvo influenciada por la dosis de fertilización.

10.1.6.5. Eficiencia productiva

La eficiencia productiva (EP) se define como el porcentaje de nutriente absorbido por el fruto en relación al total de nutriente absorbido por la planta (Segura et al., 2009b; Contreras et al., 2013b). La proporción que va destinada a fruto, es la de mayor interés, al ser el órgano consumible en los cultivos hortícolas estudiados (melón, tomate, pimiento y judía). Por tanto, la EP puede ser un indicador de gran importancia.

En la mayoría de los cultivos ensayados, la EP de N y K sufre una reducción con las dosis más elevadas de NK o NPK. En melón, el mayor nivel de NK aplicado al cultivo (F₅) obtuvo una EP de N y K significativamente menor. Esta reducción de la EP

denota una variación en la proporción de N y K destinada a la parte generativa y vegetativa de la planta en función de la dosis de nutriente, destinándose mayor porcentaje de N y K a la parte vegetativa cuando se aumenta en exceso la fertilización NK en detrimento del fruto. Destacar, que la EP fue elevada en todos los tratamientos, oscilando en el primer ciclo entre 55-58% para el N y entre 45-54% para el K, según tratamiento. En el segundo ciclo, las EP fueron mayores, situándose en el rango de 55-61% para el N y 65-74% para el K.

En el cultivo de tomate, la EP de P y K estuvo influenciada por el nivel de fertilizante aplicado, reduciéndose al incrementar la dosis NPK. La EP de N no se vio afectada. La EP varió de 43-59% para N, 34-50% para P, y 51-63% para el K, dependiendo del tratamiento. Fisher et al. (2002) en cultivo de tomate desarrollado en hidropónico (sistema NFT) obtuvieron valores similares de EP de N y K, al igual que Magán (2005) en tomate desarrollado en cultivo sin suelo y recirculación que obtuvo una EP del 40% para el N, 35% para el P y 49% para el K, eficiencias ligeramente inferiores a las determinadas en este ensayo.

En pimiento, la concentración NK no tuvo efecto significativo sobre la EP de estos nutrientes, cuyos valores fueron del 39-45% para el N y 40-47% para el K, según tratamiento. Con independencia de la dosis NK aplicada, las EP registradas en el cultivo de pimiento fueron levemente menores a las encontradas para el cultivo de melón y tomate.

En el cultivo de judía, la EP del N se vio afectada por el nivel de fertilización, disminuyendo con la aplicación más elevada ($F_{1,5NK}$). A diferencia de los otros cultivos, la judía verde presentó una EP media-baja con valores del orden de 33-39% para N y 32-37% para K dependiendo del tratamiento. Resultados similares fueron obtenidos por López-Gálvez et al. (1991), quienes determinaron para este cultivo similares de PE cuando se desarrolla en invernadero.

10.1.7. Salinidad del suelo

La salinidad del suelo determinada como CE del extracto saturado (CE_{es}) puede verse afectada por aplicaciones excesivas de fertilizantes químicos (Alam, 1994). En el experimento desarrollado en la Tesis, dosis de NK mayores de 136 kg N ha^{-1} y 131 kg

K ha⁻¹ elevaron la salinidad del suelo en el cultivo de judía. Al elevar la dosis a 204 kg N ha⁻¹ y 197 kg K ha⁻¹ el nivel de salinidad de suelo prácticamente se duplicó, pasando de CE_{es} de 1,7 dS m⁻¹ a 3,2 dS m⁻¹. Estos valores reflejan que, en las condiciones de desarrollo de la experiencia, la aplicación de 204 kg N ha⁻¹ y 196 kg K ha⁻¹ en fertirrigación (F_{1,5NK}) fue excesiva, y el N y K aportado no fue absorbido por la planta (la EMA se situó en un 40% para el N y un 45% para el K) produciendo una elevación de la salinidad del suelo. Por otra parte, el aporte de la dosis 136 kg N ha⁻¹ y 131 kg K ha⁻¹ (F_{1,5NK}) no aumentó la salinidad del suelo con respecto a aplicar agua regenerada sin aporte de fertilizantes adicionales, presentando valores similares de CE_{es}. Esto se puede deber a que la dosis aplicada en este tratamiento se aproximó a las extracciones de N y K realizadas por la planta.

10.2. EFECTO DE LA SALINIDAD DEL AGUA DE RIEGO

10.2.1. Producción de fruto

La tolerancia a la salinidad de los cultivos hortícolas ha sido ampliamente estudiada en distintas condiciones de desarrollo (Shannon y Francois, 1978; Meiri et al., 1981; Mangal et al., 1988; Mendlinger y Pasternak, 1992a, 1992b; Dorais y Papadopoulos, 2000; Li et al., 2001; Shani y Dudley, 2001; Olympios et al. 2003; Botía et al., 2005; Magán, 2005; Kaya et al., 2007; Amer, 2010). Los cultivos de melón, tomate y pimiento se definen como moderadamente sensibles a la salinidad del agua, reduciendo la producción y número de frutos al aumentar la salinidad. Ayers y Westcot (1985) cifran en un 10% las pérdidas de producción para el cultivo de melón, tomate y pimiento cuando se emplea un agua de riego de 2,4 dS m⁻¹, 2,3 dS m⁻¹ y 1,5 dS m⁻¹ respectivamente.

En los ensayos desarrollados en la Tesis, el aumento de la salinidad del agua de riego de 0,6 a 2,6 dS m⁻¹ produjo una disminución del tamaño de fruto comercial de melón sin afectar la producción. Al aumentar la salinidad del agua a 2,6 dS m⁻¹ descende el número de frutos de Calibre 1 (800 a 1200 g ud⁻¹), siendo compensada la producción por un incremento del número de frutos de Calibre 2 (500 a 800 g ud⁻¹). En las condiciones de desarrollo de las experiencias se mostró una mayor tolerancia del cultivo a la salinidad con respecto a lo documentado por Ayers y Westcot (1985), ya

que se alcanzaron CE medias de la disolución de $3,6 \text{ dS m}^{-1}$ sin producir efectos negativos en el cultivo, frente a la CE umbral establecida por Ayers y Westcot (1985) de $1,5 \text{ dS m}^{-1}$ para el cultivo de melón. Este aumento de tolerancia podría estar asociado a varios factores, como son el sistema de riego (localizado de alta frecuencia), tipo de suelo (enarenado) y cultivo protegido (invernadero), (Rhoades, 1971; Parra y Cruz-Romero, 1977; Martínez, 1988; Segura, 1995; Maroto, 1990; Sonneveld, 2004; Hoffman y Shannon, 2007). También podría estar asociado al tipo de melón, melón Galia, ya que este tipo presenta mayor tolerancia a la salinidad que otros, y así lo documentan Botía et al. (2005).

Otra de las causas por la que no se encontró reducción de la producción con la disolución de fertirrigación de CE: $3,6 \text{ dS m}^{-1}$ podría deberse a la menor susceptibilidad que presentan los cultivos hortícolas a la salinidad inducida por nutrientes con respecto a la inducida por NaCl (Lycoskoufis et al., 2011; Giuffrida et al., 2014). La salinidad obtenida en este tratamiento fue inducida por la combinación de nutrientes y NaCl.

La disminución del tamaño del fruto de melón por efecto de la salinidad ha sido descrita por Meiri et al. (1981), y Mendlinger y Pasternak (1992a), como consecuencia del incremento del NaCl en el medio de cultivo. Sin embargo, el aumento del número de frutos se ha descrito en bibliografía como consecuencia de un aumento de la salinidad en el medio por adicción de fertilizantes (Feleafel y Mirdad, 2014).

En el experimento desarrollado sobre tomate, la utilización de agua de mayor salinidad no produjo descenso de los rendimientos. El aumento de la CE de la disolución de fertirrigación hasta $3,7 \text{ dS m}^{-1}$, no redujo la producción de fruto, mostrando el cultivo, en condiciones de desarrollo de la experiencia, mayor tolerancia a la salinidad que la estimada por Ayers y Westcot (1985). Estudiando la producción por periodos, se observa un efecto en el número de frutos en el último periodo de recolección, aumentando con el incremento de la salinidad del agua, sin repercutir en un aumento de la producción. Este efecto también se detectó en los ensayos desarrollados sobre cultivo de melón, llegando a reducir el tamaño de fruto con el agua de mayor salinidad. Sin embargo, en cultivo de tomate, aunque se denota una tendencia a reducir el tamaño de fruto, no fue estadísticamente significativo, debido probablemente a que el nivel de salinidad empleado fue tolerado por el cultivo.

Al igual que lo comentado para el melón, la tolerancia a la salinidad mostrada por el cultivo de tomate pudo estar asociada a los factores anteriormente citados: riego localizado de alta frecuencia, suelo enarenado, invernadero y especialización de la sal (nutrientes frente a la inducida por NaCl) que incrementan la tolerancia de los cultivos a la salinidad (Rhoades, 1971; Parra y Cruz-Romero, 1977; Martínez, 1988; Segura, 1995; Maroto, 1990; Sonneveld, 2004; Hoffman y Shannon, 2007; Lycoskoufis et al., 2011).

A diferencia de los obtenido en este experimento, Alomran et al. (2012), encontraron que la utilización de agua de $3,6 \text{ dS m}^{-1}$ con respecto a agua de $0,9 \text{ dS m}^{-1}$ en cultivo de tomate en invernadero, reduce la producción de fruto en torno al 21-25% dependiendo del ciclo. Aunque encontraron interacción entre el volumen de agua aplicado y el tipo de suelo, de forma que el aumento del volumen de agua (en un 33%) con respecto a las necesidades del cultivo y la utilización de riego subterráneo consiguen reducir los efectos negativos producidos por el agua de $3,6 \text{ dS m}^{-1}$. Además, estos autores encontraron que la incorporación de arcilla al suelo causó un aumento de la producción al igual que la utilización de riego subterráneo indicando que una adecuada dotación de riego consigue mitigar el efecto de la salinidad.

Los rendimientos de pimiento no fueron afectados por la calidad del agua empleada, presentando los tratamientos regados con agua regenerada producciones similares a las obtenidas con el agua convencional de origen subterráneo. La salinidad debida al incremento de la CE de la disolución nutritiva, de 2,1 (agua regenerada) a $3,70 \text{ dS m}^{-1}$ (mayor dosis de fertirrigación) no produjo descensos en la producción, mostrando mayor tolerancia respecto a los niveles establecidos por Ayers y Wescot (1985) que cifran una CE umbral del agua de riego en $1,0 \text{ dS m}^{-1}$ para este cultivo. Además de por los factores citados anteriormente y asociados a las condiciones de desarrollo del ensayo, esta mayor tolerancia puede estar relacionada con la composición de la disolución nutritiva. La conductividad eléctrica del agua regenerada ($2,1 \text{ dS m}^{-1} \text{dS}$) está asociada en una parte importante a nutrientes, principalmente amonio y fósforo, con lo cual la tolerancia a la salinidad de un cultivo puede ser mayor cuando se utiliza este tipo de agua, puesto que se puede producir el efecto por presión osmótica, pero no por toxicidad por ión específico al ser la concentración de NaCl relativamente baja en el agua regenerada. Aunque la mayor tolerancia de los cultivos hortícolas a la salinidad por nutrientes con respecto a la salinidad por NaCl ya se ha comentado anteriormente, y

ha sido documentada por Lycoskoufis et al. (2011) para cultivo de tomate y por Giuffrida y Leonardi (2012) para cultivo de pimiento, estos autores obtienen un descenso en la producción de pimiento, desarrollado en invernadero y cultivo sin suelo, cuando incrementan la salinidad de la disolución de nutrientes de 2 a 4 dS m⁻¹ por adicción de nutrientes.

Por otra parte, la cantidad de N y K presente en el agua regenerada y que supuso un aporte de 47 kg ha⁻¹ de N y 23 kg ha⁻¹ de K en el computo total del ciclo de cultivo no fue suficiente para conseguir un aumento significativo en la producción de fruto de pimiento con respecto al agua subterránea. Otros autores obtienen en diferentes cultivos una mejora de la productividad con la utilización de agua regenerada (Buran et al., 1987; Pérez et al., 1988; Ramos et al., 1989; Papadopoulos y Savvides, 2003; Shetty et al., 2012). Aunque también son numerosos los estudios en los que el agua regenerada no muestra efecto sobre la producción de fruto (Contreras, 2001; Contreras et al., 2012b; Segura et al., 2004; Martínez et al., 2013).

10.2.2. Calidad de fruto

La salinidad del agua de riego no solo tiene influencia sobre la producción de fruto, sino también sobre la calidad de los mismos (Dorais y Papadopoulos, 2000). La mayoría de los estudios realizados sobre tomate muestran que incrementos en la CE de la solución nutritiva mejoran la calidad de los frutos (Adams y Ho 1989; Gough y Hobson 1990; Chapagain y Wiesman 2004; Contreras et al., 2007). Corroborando estos estudios, en el experimento de tomate desarrollado en la Tesis, la salinidad del agua de riego influyó sobre la mayoría de los parámetros analizados que afectan a la calidad organoléptica del fruto, a excepción del pH. La salinidad del agua produjo un aumento del orden del 10% al 16%, según periodo de recolección, en el contenido de sólidos solubles totales (°Brix). Los valores obtenidos por los tratamientos de agua de mayor salinidad se situaron entre 5,0 y 5,9 °Brix dependiendo de la recolección. Estos niveles fueron ligeramente superiores a los determinados por Magán (2005) para unas condiciones de salinidad similar, debido probablemente a que las variedades estudiadas en cada caso fueron diferentes. Al igual que Ho (1996) y Magán (2005), también se encontró que la concentración de sólidos solubles totales en fruto estaba positivamente correlacionada con el porcentaje de materia seca de fruto.

La acidez titulable del fruto aumentó con la salinidad de agua, con diferencias significativas según la fase de recolección (1ª y 3ª recolección). Los valores de acidez titulable obtenidos fueron de 50 meq L⁻¹, ligeramente inferiores a los determinados por Magán (2005) de 59 meq L⁻¹, para concentraciones similares de Cl⁻ y Na⁺, debido probablemente, a las distintas variedades de tomate estudiadas y a los sistemas de cultivo (cultivo en suelo enarenado vs. cultivo sin suelo). El uso de sistemas hidropónicos aumenta los valores de determinados parámetros de calidad tales como la acidez titulable, en comparación con los sistemas de cultivo en suelo (Benoit y Ceustermans, 1987). El pH de fruto de tomate no fue afectado por la salinidad del agua alcanzando valores cercanos a 4,3, similares a los valores obtenidos por Ben-Oliel et al. (2004) para esta especie.

El incremento de 1,6 dS m⁻¹ de la CE del agua de riego (de 0,6 a 2,2 dS m⁻¹) produjo un aumento medio de 0,5 % en el contenido de materia seca del fruto, coincidiendo con lo descrito por Li et al. (2001) y Magán (2005), que establecieron una correlación lineal entre el contenido de materia seca de fruto y la C.E. del agua de riego, con un incremento medio de 0,3 unidades porcentuales en el contenido de materia seca de fruto por incremento unitario de CE de la disolución. Los valores de materia seca de fruto obtenidos están dentro del rango de normalidad (5,0% a 7,5%) propuesto por Davies y Hobson (1981).

El aumento general del contenido de materia seca de fruto (%) con el avance de las recolecciones y la reducción del peso medio podrían estar relacionados con el incremento de la salinidad del suelo, debido a la acumulación de las sales aplicadas en fertirrigación, pero al repetirse en todos los tratamientos, independientemente de la calidad del agua es más probable que esté asociado a las condiciones climáticas. En condiciones de baja humedad relativa el porcentaje de materia seca en el fruto es mayor (Bertin et al., 2000). En las últimas recolecciones, la radiación es mayor, debido a que el periodo de recolección se sitúa de febrero a abril, con lo cual la temperatura también, produciendo una bajada en la humedad relativa y el consiguiente efecto en la materia seca.

En el experimento de pimiento, el riego con agua regenerada no produjo un incremento significativo de los parámetros de calidad del fruto, aunque este tipo de agua presentaba una CE superior al agua de origen subterráneo (2,1 frente a 1,2 dS m⁻¹).

10.2.3. Producción de materia seca aérea de la planta

La producción de materia seca está influenciada por el nivel de salinidad, registrando reducciones en condiciones salinas (Romero-Aranda et al., 2001; Caraciolo et al., 2002; Wu y Dodge, 2005).

En los ensayos desarrollados en la Tesis, y coincidiendo con los resultados de producción de fruto, la salinidad del agua no afectó la producción de materia seca de melón, lo que denota la tolerancia del cultivo al nivel de salinidad aplicado. Está claro que los resultados obtenidos en el experimento arrojaron una clara tolerancia del cultivo para los niveles salinos empleados (CE del agua de riego de 2,6 dS m⁻¹ y hasta 3,8 dS m⁻¹ de la disolución de fertirrigación) dado que en ningún caso se observaron los efectos descritos en bibliografía producidos por estrés salino.

En lo que respecta al cultivo de pimiento, la aplicación de agua regenerada (de mayor salinidad) no produjo una reducción en la producción de materia seca, sino todo lo contrario, la aumentó debido posiblemente a la concentración de nutrientes presente en este tipo de agua, y no a la CE de la misma (2,1 dS m⁻¹). Diversos estudios desarrollados sobre cultivo de pimiento reflejan la reducción en la producción de materia seca cuando se incrementa la salinidad del medio mediante NaCl (Romero-Aranda et al., 2001; Caraciolo et al., 2002; Wu y Dodge, 2005), si bien los niveles presentes en el agua regenerada fueron totalmente tolerados por el cultivo de pimiento en las condiciones de desarrollo del experimento. Por otra parte, numerosos son los trabajos que muestran un incremento en la materia seca tisular de la planta cuando se incrementa la salinidad de la disolución nutritiva mediante la adicción de fertilizantes nitrogenados y potásicos (Contreras et al., 2006; Segura et al., 2007) lo que justifica el efecto obtenido en el experimento de la Tesis.

10.2.4. Absorción total de nutrientes y sodio por la parte aérea de la planta

El estrés generado en los cultivos por la exposición a la salinidad (NaCl) tiene influencia sobre los procesos de absorción y transporte de nutrientes en la planta, pudiendo producir desordenes nutricionales y desequilibrios iónicos (Läuchli y Epstein, 1970). La salinidad reduce la absorción de N, P, K, y Ca (Lynch y Läuchli, 1985; Martínez et al., 1996; Magán et al., 2005) afectando el desarrollo de los cultivos.

Al igual que en otros cultivos, la absorción de nutrientes por la planta de melón está influenciada por el nivel de salinidad (Romero-Aranda et al., 2001; Caraciolo et al., 2002; Wu y Dodge, 2005), produciendo una reducción de la absorción de K (Lynch y Läuchli, 1985; Chen et al., 2009).

En las experiencias de melón desarrolladas en la Tesis, la salinidad del agua afectó la absorción de N y K por la planta. En el primer año, la utilización de agua de riego de salinidad elevada no produjo diferencias significativas en la absorción de N por la parte aérea de la planta, pero en lo que respecta a la absorción de K, causó una reducción del 21% con respecto al agua de salinidad media, coincidiendo con lo observado por Chen et al. (2009) que encontraron que la absorción de K disminuía con la salinidad del suelo. Sin embargo, en el segundo año, con el aumento de las dosis NK, no se muestra este efecto de reducción de la absorción de K con el incremento de la salinidad del agua. Estos resultados denotan la capacidad que tiene la fertilización NK de compensar los efectos negativos en la absorción de K producidos por la salinidad como documentan Kaya et al. (2007).

En el segundo ciclo de melón se detectó un incremento de la absorción de N con el agua de mayor salinidad, este incremento estuvo asociado a una mayor concentración de N en el tejido de la planta (Anexo 2, Tabla A2.2), coincidiendo por lo documentado por Munns y Termaat (1986) que describen como la concentración de N en el tejido de la planta (mg de N kg^{-1} de materia seca) incrementa o se mantiene constante en condiciones salinas si se realiza un aporte suficiente de nitrógeno

Además, se obtuvo una relación lineal entre la absorción de N y K por la parte aérea en función de la calidad del agua. La relación de absorción obtenida para el agua de menor salinidad fue de $N = 0,596 K - 1,687$, con un coeficiente de

determinación $R^2 = 0,982$, y la función obtenida para el agua de mayor salinidad fue $N = 0,719 K - 2,31$ con un $R^2 = 0,995$. La salinidad del agua de riego aumentó la absorción de N por el cultivo y también modificó la relación N:K, elevándola el agua de mayor salinidad (1:1,9 vs. 1:17). La relación N:K fue mayor debido probablemente a que el Na^+ compite con el K^+ en condiciones salinas (Marschner, 1995; Sánchez, 2004), reduciendo así la absorción de K.

En el cultivo de tomate, los tratamientos estudiados en la Tesis mostraron diferencias significativas en la cantidad de nutrientes absorbidos por la parte aérea de la planta en función de la salinidad del agua de riego empleada. El agua de mayor salinidad aumentó la absorción de N, K, Mg y Na sin alterar la de P y Ca, además elevó ligeramente la relación de absorción N:K (1:1,5 vs. 1:1,4). El incremento de absorción de Na y Mg por la planta estuvo relacionado al incremento de la concentración tisular de estos elementos en el tejido como consecuencia de la mayor presencia en el agua de riego, y en menor medida al incremento de materia seca total producida. Este efecto ya había sido documentado en estudios realizados en el área mediterránea (Malorgio et al., 2001). Sin embargo, el incremento de absorción de N y K únicamente estuvo asociado al aumento de la materia seca producida con el mayor nivel de salinidad (Anexo 1, Tabla A.1.3), coincidiendo con lo observado por Stanghellini et al. (2003). Está claro que los resultados obtenidos en el experimento arrojaron una clara tolerancia del cultivo al nivel de salinidad estudiado, dado que en ningún caso se mostraron los efectos descritos en bibliografía producidos por estrés salino. No se observó un descenso en la absorción de K como consecuencia de una menor relación K^+/Na^+ en la solución de fertirrigación detectada por Al-Karaki (2000), y tampoco se produjo un descenso en la absorción de N como consecuencia de la menor relación NO_3^-/Cl^- en la solución de fertirrigación (Magán et al., 2005). La cantidad de P absorbido por la parte aérea de la planta no se vio afectada por los niveles de salinidad del agua, coincidiendo con los resultados obtenidos por Mohammad et al. (1998) los cuales no encontraron alteraciones en la absorción de P hasta una concentración de 50 mM de NaCl en el agua de riego.

La aplicación de agua regenerada para la fertirrigación del cultivo de pimiento produjo mayor absorción de nutrientes por la planta, asociada a la mayor producción de materia seca (apartado 10.2.1.2), dado que no se encontraron diferencias significativas

en la concentración tisular de nutrientes en los órganos aéreos de la planta (Anexo 1, Tabla A1.4).

10.2.5. Distribución de materia seca, nutrientes y sodio en la planta

La distribución de materia seca y nutrientes en la planta puede verse afectada por la salinidad (Läuchli y Epstein, 1970). En los experimentos realizados en la Tesis sobre cultivo de melón, la salinidad del agua de riego afectó la distribución de materia seca, N y K en la parte aérea de la planta, influyendo en la proporción destinada a fruto. En el primer experimento, el agua de mayor salinidad incrementó la proporción de materia seca destinada a fruto de un 48 a un 53% con respecto al total producido por la planta. Un efecto similar se detectó para el N, incrementando el destinado a fruto de un 57 a un 59%, y la misma tendencia se observó en el K aunque sin diferencias significativas. Sin embargo, en el segundo experimento, aunque la tendencia fue similar, solo se obtuvieron diferencias estadísticamente significativas en el K, aumentando con la salinidad del agua de 67 a 71% compartimentado en el fruto.

En cultivo de tomate, la distribución de N en la planta no fue afectada por la salinidad del agua. Respecto al K, la salinidad del agua tuvo efecto significativo sobre la proporción de elemento destinado a tallo, reduciéndolo ligeramente. Los tratamientos regados con agua de mayor salinidad acumularon el 13 % del K total extraído por la parte aérea de la planta en el tallo, siendo del 15% en los tratamientos regados con agua de menor salinidad. Además, el aumento de la salinidad del agua redujo la proporción de P acumulado en fruto y tallo, aumentando el porcentaje destinado a hoja. Este comportamiento puede responder a cambios en el metabolismo de la planta que permite la removilización de P en el interior de la misma, como han demostrado Raghothama y Karthikeyan (2005) y Zrenner et al. (2006).

La salinidad redujo el porcentaje de Na destinado a fruto con respecto al total absorbido por la planta, acumulando mayor proporción de Na en los órganos vegetativos (hoja y tallo). Esto indica la acción de un mecanismo de adaptación a la salinidad de las plantas de tomate compartimentando el Na en las hojas (Marschner, 1995).

10.2.6. Eficiencia de uso de nutrientes

La eficiencia de uso de nutrientes puede estar influenciada por la salinidad del agua de riego (Huez-López et al., 2011). En el apartado 9.1.5 se especifican las diferentes eficiencias que se puede calcular para determinar la eficiencia en el uso del nitrógeno y otros nutrientes. En el Anexo 2 se muestran las eficiencias determinadas en los ensayos de la Tesis. A continuación se discuten los efectos debidos a la salinidad del agua de las eficiencias calculadas.

10.2.6.1. Eficiencia agronómica

En las experiencias desarrolladas sobre cultivo de melón y tomate la salinidad del agua de riego no afectó la EA de los nutrientes estudiados (NK en melón y NPK en tomate), presentado valores similares y entorno a 180 kg kg^{-1} para el N y a 99 kg kg^{-1} para el K en el segundo ciclo de melón donde se obtuvieron las producciones de fruto más elevadas, y de 320 kg kg^{-1} para el N, 2167 kg kg^{-1} para el P y de 261 kg kg^{-1} para el K en el cultivo de tomate.

A diferencia de lo observado por otros autores (Huez-López et al., 2011), en los experimentos desarrollados en la Tesis, la salinidad no redujo la EA, puesto que no causó un descenso en los rendimientos del cultivo respecto al agua de menor salinidad.

10.2.6.2. Eficiencia medio ambiental

En los cultivos desarrollados en la Tesis, la salinidad del agua tuvo influencia en la EMA de nutrientes, aumentando la eficiencia de N en los cultivos de melón y tomate y de K en el cultivo de tomate. Este efecto puede tener importancia desde el punto de vista medioambiental, puesto que al aumentar la EMA del N y K se consigue reducir posibles contaminaciones producida por exceso de estos nutrientes en el medio. El incremento de las eficiencias estuvo relacionado con la mayor absorción de estos nutrientes por la planta. En el caso del tomate, la mayor absorción de nutrientes fue consecuencia de la mayor producción de materia seca aérea, y de la mayor concentración tisular de N y K en los órganos de la planta (Anexo 1, Tabla A1.3). En el melón, el incremento estuvo asociado exclusivamente a una mayor concentración de N en el tejido de la planta (Anexo 1, Tablas A1.1 y A1.2), coincidiendo con lo observado

por Munns y Termaat (1986) quienes indican que la concentración de N en el tejido de la planta (mg de N kg^{-1} de materia seca) se incrementa o se mantiene constante en condiciones salinas.

10.2.6.3. Eficiencia de biomasa

La salinidad afectó la EB en el cultivo de tomate, presentando los tratamientos regados con agua de salinidad elevada mayor EB asociada a la mayor producción de materia seca.

La EB para el N se elevó de 47 a 55 kg kg^{-1} , de 320 a 372 kg kg^{-1} para el P, y de 39 a 45 kg kg^{-1} para el K con el agua de mayor salinidad. Los efectos producidos por la exposición a elevada salinidad del cultivo de tomate, entre otros, son un descenso de la materia fresca del cultivo que repercute en un descenso de la materia seca total (Romero-Aranda et al., 2001; Caraciolo et al., 2002; Wu y Dodge, 2005) y un aumento del porcentaje de materia seca tisular (Ali y Ismail, 2014; Giuffrida et al., 2014). En el ensayo desarrollado en la Tesis, debido posiblemente al nivel de salinidad del agua empleada (2,2 dS m^{-1}), no se produjo un descenso en la materia fresca producida, pero sí un aumento de la materia seca de fruto y tallo de la planta (Anexo 1, Tabla A1.3), consiguiendo un incremento de la materia seca total.

10.2.6.4. Eficiencia de rendimiento

La ER del N descendió en los cultivos de melón y tomate al aumentar la salinidad del agua de riego, como consecuencia de una mayor absorción del nutriente por la planta sin modificar la producción de fruto. La ER de K también decreció en el cultivo de tomate por la misma causa.

10.2.6.5. Eficiencia productiva

La salinidad afectó la EP de N y K en cultivo de melón aumentándola, lo que indica que respecto al total absorbido por la planta, en condiciones de mayor salinidad la compartimentación en fruto es mayor. En cultivo de tomate la salinidad aumentó la EP de P.

10.3. INTERACCIÓN ENTRE FERTIRRIGACIÓN Y CALIDAD DEL AGUA

10.3.1. Producción de fruto

En los experimentos desarrollados en la Tesis no ha existido interacción entre la dosis de NK o NPK y la salinidad del agua en los parámetros de producción de fruto, si bien algunos autores (Kaya et al., 2007) observan mejoras de la tolerancia a la salinidad del cultivo de melón mediante la adicción de nitrato potásico.

10.3.2. Calidad de fruto

En el experimento desarrollado sobre cultivo de tomate, existió interacción entre la salinidad del agua y la concentración NPK aplicada en fertirrigación en los parámetros de firmeza y sólidos solubles totales.

En los tratamientos regados con el agua de menor salinidad, el aumento de la fertirrigación produjo un aumento de la firmeza del fruto, asociada posiblemente al incremento de CE de la disolución nutritiva aplicada, de 1,1 a 2,1 dS m⁻¹. Sin embargo, en los tratamientos regados con agua de mayor salinidad, la firmeza no fue modificada con el incremento de la dosis NPK. Las tres dosis NPK proporcionaron valores similares de firmeza, si bien la CE media de la disolución aplicada varió de 2,6 a 3,7 dS m⁻¹ dependiendo del tratamiento de fertirrigación aplicado.

En lo que respecta a los sólidos solubles totales, la respuesta fue diferente dependiendo de la fecha de recolección. En el primer periodo de recolección, en los tratamientos regados con agua de menor salinidad, el nivel de fertilización afectó la concentración de sólidos solubles totales del fruto de tomate, presentando el tratamiento F₂, una reducción, si bien en los tratamientos regados con agua de salinidad elevada la fertirrigación no tuvo influencia. Sin embargo, en el último periodo de recolección, se apreció efecto en los tratamientos regados con el agua de salinidad elevada, la mayor dosis (F₃) aumentó sólidos solubles totales. Este incremento de sólidos solubles con la salinidad del agua de riego y la mayor dosis NPK (tratamiento WQh-F₃), podría deberse a la salinidad del medio de cultivo, que en el último periodo de recolección pudo ser más elevada debido a una posible acumulación de sales en el suelo, ya que este tratamiento presentaba la mayor CE media de la disolución de fertirrigación (3,7 dS m⁻¹)

y como está descrito en bibliografía la salinidad incrementa los sólidos solubles totales en tomate (Magán, 2005).

10.3.3. Producción de materia seca aérea de la planta

Siguiendo el patrón de la producción de fruto, en la producción de materia seca no existió interacción entre los factores estudiados para ninguno de los cultivos.

10.3.4. Absorción total de nutrientes y sodio por la parte aérea de la planta

Existió una interacción entre la salinidad del agua y la absorción de N y K por la planta en el primer ciclo de melón, donde se ensayaron dosis más bajas de NK. El tratamiento regado con agua de mayor salinidad y dosis F₃ obtuvo una menor absorción de N y K. Este efecto podría deberse a una mayor salinidad de la disolución de fertilización, si bien en el segundo ciclo de melón, donde se estudiaron dosis fertilizantes más elevadas, no existió interacción entre la salinidad del agua y la absorción de N y K por la parte aérea de la planta, por lo que no se puede concluir que existiera efecto entre la salinidad y la absorción de N y K por la planta.

En el cultivo de tomate existió interacción entre la salinidad del agua y el nivel de fertilización en la absorción total de Ca, Mg y Na por la planta. Los tratamientos que combinaron agua de mayor salinidad y las mayores dosis NPK (WQh-F₂ y WQh-F₃) redujeron la absorción de Ca y aumentaron la de Mg y Na con respecto a los tratamientos homólogos regados con el agua de menor salinidad (WQmF₂ y WQmF₃). Cramer (2002) mostró que el Na⁺ desplaza fácilmente al Ca²⁺ de sus lugares de unión extracelulares con lo cual, la disponibilidad de Ca²⁺ puede verse seriamente disminuida en condiciones de salinidad, con una baja relación Ca²⁺/Na⁺. Se ha demostrado que un incremento de la salinidad reduce la absorción de otros nutrientes, como el Ca²⁺ (Bastias et al., 2010) debido a que el exceso de sales provoca una alta presión osmótica y ocasiona la disminución en la absorción de agua, afectando a la absorción de los iones que son transportados por flujo de masas (Casas, 1999; Pardossi et al., 1999), la disminución en la absorción del Ca²⁺ en condiciones de salinidad puede ser debida a su precipitación y el aumento de la fuerza iónica de la solución del suelo que reduce su actividad (Cramer, 2002).

El tratamiento con mayor absorción de Ca fue el regado con agua de salinidad baja y mayor aporte de fertilizantes, mientras que la mayor absorción de Mg y Na fue registrada en el tratamiento de mayor aporte de fertilizantes y agua de salinidad elevada, apreciándose una mayor concentración tisular como consecuencia de la mayor concentración en el agua de riego.

10.3.5. Distribución de materia seca, nutrientes y sodio en la planta

En el primer ciclo de cultivo de melón existió interacción entre la dosis de fertirrigación y la salinidad del agua en la compartimentación de materia seca y nutrientes en los órganos de la planta. Cuando se emplea agua salina, la mayor dosis fertilizante de ese ciclo (F_3) produjo un descenso del porcentaje de materia seca, N y K destinado a fruto con respecto al total absorbido por la planta.

En cultivo de tomate, existió interacción en la distribución de nutrientes en la planta, así el tratamiento regado con agua de menor salinidad y la dosis F_4 (dosis de mejor comportamiento considerando la eficiencia de uso de nutrientes y la productividad) presentó la mayor compartimentación de N, P y K en el fruto, reduciendo el porcentaje destinado la parte vegetativa.

10.3.6. Eficiencia de nutrientes

En general, no existió interacción entre las dosis de NK o NPK y la salinidad del agua de riego en la eficiencia de uso de nutrientes para los cultivos de melón y tomate. Aunque en el primer ciclo de melón, donde las dosis de nutrientes ensayadas eran bajas, el tratamiento regado con agua de mayor salinidad y dosis deficiente de nutrientes (HS- F_1) fue el que mayor EA, EB y EB de N y K obtuvo, no existiendo diferencias entre los demás tratamientos.

10.4. DOSIS ÓPTIMAS DE NUTRIENTES EN FUNCIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA DE RIEGO

10.4.1. Cultivo de melón

Los experimentos desarrollados en la Tesis han permitido determinar la dosis óptima de N y K para este cultivo, considerando la productividad y la eficiencia de uso

de los nutrientes. Al no existir interacción entre la calidad del agua y el nivel de fertirrigación sobre la productividad del cultivo y la eficiencia de uso de nutrientes, tanto para el agua de menor salinidad como para el agua de mayor salinidad, el tratamiento óptimo fue el que aplicó 275 kg N ha⁻¹ y 533 kg K ha⁻¹ (tratamiento F₄). La aplicación de dosis mayores disminuye la eficiencia de uso de nutrientes sin producir un incremento considerable (inferior al 10%) en la producción.

Esta dosis NK produjo una producción comercial de 54,3 t ha⁻¹, y la mejor eficiencia de uso de nutrientes (EA de 198 kg kg⁻¹ para el N y 102 kg kg⁻¹ para el K; EMA del 65% para el N y 55% para el K; EB de 40 kg kg⁻¹ para el N y 41 kg kg⁻¹ para el K; ER de 308 kg kg⁻¹ para el N y 188 kg kg⁻¹ para el K; EP del 60% para el N y 69% para el K).

La dosis de N establecida como óptima es superior a la determinada por Catellanos et al. (2012) que fijan una dosis óptima de 90-100 kg N ha⁻¹. La diferencia en la dosis radica en las condiciones de desarrollo del ensayo, fundamentalmente en el contenido de N y materia orgánica del suelo, que fue mayor en el experimento desarrollado por estos autores y el cultivo pudo absorber N del suelo sin reducir la producción de fruto, ya que las cantidades de N establecidas como óptimas por estos autores fueron insuficientes para compensar a la extracción de este nutriente por el cultivo.

10.4.2. Cultivo de tomate

Al igual que lo ocurrido en el cultivo de melón, al no existir interacción entre la calidad del agua y el nivel de fertirrigación aplicado sobre la productividad del cultivo y la eficiencia de uso de nutrientes, el tratamiento fertilizante óptimo fue el mismo para los dos tipos de agua. La dosis 367 kg N ha⁻¹, 54 kg P ha⁻¹ y 448 kg K ha⁻¹ (tratamiento F₂) se consideró la más adecuada aunando aspectos de productividad y sostenibilidad del sistema de producción. Un descenso de la dosis NPK por debajo de estos valores reduce considerablemente la producción y dosis mayores disminuyen drásticamente la eficiencia de uso de nutrientes sin producir un incremento importante (9%) en la producción.

La dosis óptima obtuvo una producción comercial de 117,3 t ha⁻¹, y una elevada eficiencia de uso de nutrientes (EA de 320 kg kg⁻¹ para el N, 2172 kg kg⁻¹ para el P y 262 kg kg⁻¹ para el K; EMA del 81% para el N, 115% para el P y 97% para el K; EB de 48 kg kg⁻¹ para el N, 329 kg kg⁻¹ para el P y 40 kg kg⁻¹ para el K; ER de 407 kg kg⁻¹ para el N, 1909 kg kg⁻¹ para el P y 273 kg kg⁻¹ para el K; EP del 51% para el N, 43% para el P y 62% para el K).

10.4.3. Cultivo de pimiento

La experiencia desarrollada en la Tesis ha permitido determinar la dosis de N y K óptima para el cultivo de pimiento cuando se utiliza para riego agua regenerada considerando la productividad y la eficiencia de uso de los nutrientes.

La aplicación de 125 kg ha⁻¹ de N y 290 kg ha⁻¹ de K (tratamiento N₁K_{1,5}) obtuvo una de las mayores producciones y fue la que se presentó como la más adecuada teniendo en cuenta la sostenibilidad del sistema. La aplicación de dosis inferiores reducen la producción y dosis mayores de N disminuye drásticamente la eficiencia de uso de nutrientes y sin producir incrementos en la producción de fruto.

La dosis óptima obtuvo una producción comercial de 53,6 t ha⁻¹, y una buena eficiencia de uso de nutrientes (EA de 431 kg kg⁻¹ para el N y 186 kg kg⁻¹ para el K; EMA del 152% para el N y 90% para el K; EB de 61 kg kg⁻¹ para el N y 26 kg kg⁻¹ para el K; ER de 284 kg kg⁻¹ para el N y 207 kg kg⁻¹ para el K; EP del 43% para el N y 47% para el K).

Hay que considerar que la EMA superó el 100% para el N, siendo la extracción realizada por la planta de 190 kg N ha⁻¹, con lo cual en suelos con niveles bajos en N, sería recomendable elevar el aporte de N a estos 190 kg ha⁻¹.

10.4.4. Cultivo de judía

La experiencia desarrollada ha permitido establecer una dosis óptima de N y K para el cultivo de judía cuando se utiliza para riego agua regenerada considerando los valores de productividad y eficiencia de uso de los nutrientes obtenidos.

La aplicación exclusivamente de agua regenerada (tratamiento F_{DUW}), con un aporte total de nutrientes de 47 kg ha^{-1} de N y 23 kg ha^{-1} de K fue suficiente para obtener los máximos rendimientos y conseguir una eficiencia en el uso de los nutrientes muy elevada.

La producción total obtenida fue de $12,6 \text{ t ha}^{-1}$, y una excelente eficiencia de uso de nutrientes (EA de 223 kg kg^{-1} para el N y 456 kg kg^{-1} para el K; EMA del 152% para el N y 273% para el K; EB de 68 kg kg^{-1} para el N y 138 kg kg^{-1} para el K; ER de 152 kg kg^{-1} para el N y 170 kg kg^{-1} para el K; EP del 33% para el N y 37% para el K).

La absorción de N y K por el cultivo superó ampliamente los aportes realizados con el agua de riego, con lo cual la planta absorbió nutrientes del suelo, por tanto, en suelos con niveles bajos de nutrientes los aportes recomendados serían de 81 kg N ha^{-1} y 84 kg K ha^{-1} , en base a las extracciones realizadas por la planta para una producción de $13,1 \text{ t ha}^{-1}$.

La aplicación de dosis mayores de N y K, hasta 136 kg N ha^{-1} y 131 kg K ha^{-1} , disminuyen la eficiencia de uso de nutrientes y no mejoran la producción. Por otra parte, el incremento hasta niveles de 204 kg ha^{-1} de N y 197 kg ha^{-1} de K, además de producir un descenso en la eficiencia de los nutrientes, genera un descenso en la producción de fruto.

CAPITULO XI

Conclusiones Generales

CONCLUSIONES GENERALES

1. Las experiencias desarrolladas han permitido ajustar unas dosis óptimas de aplicación de NK o NPK para los cultivos de melón, tomate, pimiento y judía verde en condiciones de invernadero y suelo enarenado del sureste español, considerando la productividad y la eficiencia en el uso de los nutrientes, tanto para aguas de buena calidad como aguas de mayor salinidad.
2. La utilización de aguas salobres ($2,2\text{--}2,6\text{ dSm}^{-1}$) es una opción viable para la fertirrigación de los cultivos de melón y tomate, porque no reduce la productividad y aumenta la calidad organoléptica de los frutos y la eficiencia de uso de los nutrientes.
3. El empleo de agua regenerada es una estrategia sostenible para la producción de cultivos hortícolas de invernadero que permite reducir o eliminar, en función del tipo de cultivo, el uso de fertilizantes comerciales.

BIBLIOGRAFIA

- Adams J.F., Doerge T.A. 1987.** Soil salinity and soil acidity as factors in plant nutrition. *Future Developments in Soil Science Research* 193-203.
- Adams P. 1992.** Crop nutrition in hydroponics. *Acta Horticulturae* 323: 289-305.
- Adams P., El-Gizawy AM. 1986.** Effect of salinity and watering level on the calcium content of tomato fruit. *Acta Horticulturae* 190:2 53-259.
- Adams P., Ho L.C. 1989.** Effects of constant fluctuating salinity on the yield, quality, and calcium status of tomatoes. *Journal of Horticultural Science* 64:725-732.
- Adams P., Ho L.C. 1992.** The susceptibility of modern tomato cultivars to blossom-end rot in relation to salinity. *Journal of Horticultural Science* 67: 827-839.
- Adams, P. 1987.** Mineral Nutrition. In *The Tomato Crop, a Scientific Basis for Improvement*. J. Atherton and J. Rudich (eds).
- Agencia Andaluza del Agua (AAA). 2009a.** Demarcación hidrográfica de las cuencas mediterráneas andaluzas. Estudio General de la Demarcación. Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía. <http://www.juntadeandalucia.es/agenciadelagua/>
- Agencia Andaluza del Agua (AAA). 2009b.** Posibilidad de reutilizar las aguas residuales regeneradas. <http://www.juntadeandalucia.es/agenciadelagua/>
- Agencia de Medio Ambiente (AMA). 1991.** Recursos Naturales y Crecimiento Económico en el Campo de Dalías. Monografías de Economía y Medio Ambiente N°2. Agencia de Medio Ambiente, Sevilla. 256 pp.
- Ahmad J.U., Goni M.A. 2010.** Heavy metal contamination in water, soil, and vegetables of the industrial areas in Dhaka, Bangladesh. *Environmental Monitoring and Assessment* 166(1-4): 347-357.
- Aikinci I.E., Abak K., Buyukalaca S. 1999.** Screening some Turkish melon genotypes at the germination level for tolerance to salinity. *Acta Horticulturae* 492:193-200.
- Akponikpè P.B., Wima K., Yacouba H., Mermoud A. 2011.** Reuse of domestic wastewater treated in macrophyte ponds to irrigate tomato and eggplant in semi-arid West-Africa: Benefits and risks. *Agricultural Water Management* 98(5): 834-840.
- Al-Abdulqader M.A., Al-Jaloud A.A. 2003.** Economics of using treated sewage water in agriculture in Saudi Arabia, paper presented at The Sixth Gulf Water Conference held by the Water. Science and Technology Association in Riyadh, Kingdom of Saudi Arabia, in 8-12 March, 2003.
- Alam S.M. 1994.** Nutrient uptake by plants under stress condition. In *Handbook of plant and crop stress*, ed. M. Pessarakli, 227–243. New York: Marcel Dekker.
- Alcaraz C.F., Remojano F., León A., Llorente S. 1982.** Anionic relationship in leaf petiole sap of tomato and capsicum plants growing in a glasshouse. *Journal of Plant Nutrition* 5(2): 173-181.
- Ali H.E.M., Ismail G.S.M. 2014.** Tomato fruit quality as influenced by salinity and nitric oxide. *Turkish Journal of Botany* 38: 122-129.
- Al-Jaloud A., Hussain G., Al-Saati A.J., Karimullah S. 1993.** Effect of wastewaters on plant growth and soil properties. *Arid Soil Research and Rehabilitation* 7:173-179.
- Al-Karaki G.N. 2000.** Growth, sodium, and potassium uptake and translocation in salt stressed tomato. *Journal of Plant Nutrition* 23(3): 369–379.

- Al-Lahham O., El Assi N.M., Fayyad, M. 2003.** Impact of treated wastewater irrigation on quality attributes and contamination of tomato fruit. *Agricultural Water Management* 61(1): 51-62.
- Al-Nakshabandi G.A., Saqqar M.M., Shatanawi M.R., Fayyad M., Al-Horani H. 1997.** Some environmental problems associated with the use of treated wastewater for irrigation in Jordan. *Agricultural Water Management* 34:81-94.
- Alomran A.M., Al-Harbi A.A.R., Alwabel M.A., Nadeem M.E.A., Al-Eter A. 2012.** Management of irrigation water salinity in greenhouse tomato production under calcareous sandy soil and drip irrigation. *Journal of Agricultural Science and Technology* 14(4): 939-950.
- Amer K.H. 2010.** Corn crop response under managing different irrigation and salinity levels. *Agricultural Water Management* 97(10): 1553-1563.
- Andalucía. Decreto 36/2008, de 5 de febrero,** por el que se designan las zonas vulnerables y se establecen medidas contra la contaminación por nitratos de origen agrario. Boletín Oficial de la Junta de Andalucía (BOJA) 20 de Febrero de 2008 núm. 36, pp. 5-15.
- Andalucía. Orden de 18 de noviembre de 2008,** por la que se aprueba el programa de actuación aplicable en las zonas vulnerables a la contaminación por nitratos procedentes de fuentes agrarias designadas en Andalucía. Boletín Oficial de la Junta de Andalucía (BOJA) 8 de Enero de 2009 núm. 4, pp. 39-49.
- Anderson J. 2003.** The environmental benefits of water recycling and reuse. *Water Supply* 3(4): 1-10.
- Apse M., Blumwald E. 2002.** Engineering salt tolerance in plants. *Current Opinion in Biotechnology* 13: 146-150.
- Asano T., Levine A.D. 1998.** Wastewater reclamation, recycling and reuse: an introduction. In: *Wastewater Reclamation and Reuse*. T.Asano (ed.), Water Quality Management Library 10. Technomic Publishing Co. Inc. Pennsylvania. pp. 1-56.
- Asano T., Smith R.G., Tchobanoglous G. 1984.** Municipal wastewater: Treatment and reclaimed water characteristics. P. 2:1-2:26. In: *Irrigation with Reclaimed Municipal Wastewater- A Guidance Manual*. G. S. Pettygrove and T. Asano (eds.) Report N° 84-1 wr. Calif. State Water Resources Control Board. Sacramento, California. U.S.A.
- Asao T., Asaduzzaman M., Mondal M.F., Tokura M., Adachi F., Ueno M., Ban T. 2013.** Impact of reduced potassium nitrate concentrations in nutrient solution on the growth, yield and fruit quality of melon in hydroponics. *Scientia Horticulturae* 164: 221-231.
- Asch F., Dingkuhn M., Miezan K., Dörffling K. 2000.** Leaf K/Na ratio predicts salinity induced yield loss in irrigated rice. *Euphytica* 113: 109-118.
- Ashraf M., Athar H.R., Harris P.J., Kwon T.R. 2008.** Some prospective strategies for improving crop salt tolerance. *Advance in Agronomy* 97: 45-110.
- Ashraf M., Foolad M.R. 2007.** Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance. *Environment Experimental of Botany* 59: 206-216.
- Ashraf M., Harris P.J. 2004.** Potential biochemical indicators of salinity tolerance in plants. *Plant Science* 166: 3-16.

- Ashraf M., Khanum A. 1997.** Relationship between ion accumulation and growth in two spring wheat lines differing in salt tolerance at different growth stages. *Journal of Agronomy and Crop Science* 178: 39-51.
- Aslam M., Huffaker R.C., Rains W. 1984.** Early effects of salinity on nitrate assimilation in barley seedlings. *Plant Physiology* 76: 321-325.
- Asri F.Ö., Sönmez S. 2010.** Reflection of different applications of potassium and iron fertilization on tomato yield and fruit quality in soilless medium. *Journal of Food, Agriculture and Environment* 8(3-4): 426-429.
- Athar H., Ashraf M., Wahid A., Jamil A. 2009.** Inducing salt tolerance in canola (*Brassica napus* L.) by exogenous application of glycinebetaine and proline: Response at the initial growth stages. *Pakistan Journal of Botany* 41 (3): 1311-1319.
- Aucejo A., Ferrer J., Gabaldón C., Marzal P., Seco A. 1997.** Diagnosis of boron, fluorine, lead, nickel and zinc toxicity in citrus plantations in Villarreal, Spain. *Water, Air, and Soil Pollution* 94(3-4): 349-360.
- Ayers R.S., Wescott D.W. 1985.** Water quality for agriculture, FAO Irrigation and Drainage Paper no. 29, Rome, Italy, 174 pp.
- Azcon-Bieto J., Talon M. 2008.** Fundamentos de Fisiología Vegetal. Interamericana-McGraw-Hill. Madrid. p. 651.
- Bachmann J., Horton R., Van Der Ploeg R.R. 2001.** Isothermal and nonisothermal evaporation from four sandy soils of different water repellency. *Soil Science Society of America Journal* 65(6): 1599-1607.
- Balkhair K.S., El-Nakhlawi F.S., Ismail S.M., Al-Solimani S.G. 2013.** Teated wastewater use and its effect on water consercarion, vegetative yield, yield components and water use efficiency of some vegetable crops grown under two different irrigation systems in western region, Saudi Arabia. *European Scientific Journal* 9(21).
- Balks M.R., Bond W.J., Smith C.J. 1998.** Effects of sodium accumulation on soil physical properties under an effluent-irrigated plantation. *Australian Journal of Soil Research* 36: 821-830.
- Bar Tal A., Aloni B., Karni L., Oserovitz J., Hazan A., Itach M., Gantz S., Avidan A., Posalski I., Tratkovski N., Rosenberg R. 2001b.** Nitrogen nutrition of greenhouse pepper, I: Effects of nitrogen concentration and $\text{NO}_3\text{:NH}_4$ ratio on yield, fruit shape, and the incidence of blossom end rot in relation to plant mineral composition. *HortScience* 36 (7): 1244-1251.
- Bar Yosef B. 1977.** Trickle irrigation and fertilization of tomatoes in sand dunes: water, N, and P distributions in the soil and uptake by plants. *Agronomy Journal* 69(3): 486-491.
- Barber S.A. 1995.** Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach. Wiley, New York. USA. 414 pp.
- Barker A.V., Bryson G.M. 2007.** Nitrogen. *Handbook of Plant nutrition*, 21-50.
- Bar-Tal A., Aloni B., Karni L., Rosenberg R. 2001a.** Nitrogen nutrition of greenhouse pepper. II. Effects of nitrogen concentration and $\text{NO}_3\text{:NH}_4$ ratio on growth, transpiration, and nutrient uptake. *HortScience* 36(7): 1252-1259.
- Basiouny F.M. 1984.** The use of municipal treated effluent for peach tree irrigation. *Proceedings of the Florida State Horticultural Society* 97: 345-347.

- Bastías E., Alcaraz-López C., Bonilla I., Martínez-Ballesta M.C., Bolaños L., Carvajal M. 2010.** Interactions between salinity and boron toxicity in tomato plants involve apoplastic calcium. *Journal of Plant Physiology* 167(1): 54-60.
- Batanouny K.H. 1996.** Ecophysiology of halophytes and their traditional use in the Arab World. *Halophytes and Biosaline Agriculture*, 73-96.
- Báth B., Otabbong E. 2013.** Availability of phosphorus in greenhouse cropping systems with tomatoes—influence of soil and citric acid. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Soil and Plant Science* 63(6): 483-488.
- Beltrao J., Asher J.B. 1993.** Simulation of maize yield response to combined effects of nitrogen fertilization versus irrigation and plant population. In *Optimization of Plant Nutrition* (pp. 153-155). Springer Netherlands.
- Beltrão J., Correia P.J., Costa M., Gamito P., Santos R., Seita J. 2014.** The Influence of Nutrients on Turfgrass Response to Treated Wastewater Application, Under Several Saline Conditions and Irrigation Regimes. *Environmental Processes* 1(2): 105-113.
- Bénard C., Gautier H., Bourgaud F., Grasselly D., Navez B., Caris-Veyrat C., Genard M. 2009.** Effects of low nitrogen supply on tomato (*Solanum lycopersicum*) fruit yield and quality with special emphasis on sugars, acids, ascorbate, carotenoids, and phenolic compounds. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 57(10): 4112-4123.
- Benoit F., Ceustermans N. 1987.** Some qualitative aspects of tomatoes grown on NFT. *Soilless Culture* 3:3-7.
- Ben-Oliel G., Kant S., Naim M., Rabinowitch H.D., Takeoka G.R., Buttery R.G., Kafkafi U. 2004.** Effects of ammonium to nitrate ratio and salinity on yield and fruit quality of large and small tomato fruit hybrids. *Journal of Plant Nutrition* 27: 1795-1812
- Bergmann W. 1992.** Colour atlas: nutritional disorders of plants. Gustav Fischer Verlag.
- Bernstein L. 1963.** Osmotic adjustment of plants to saline media. II. Dynamic phase. *American Journal of Botany*, 360-370.
- Bernstein L., Francois L.E., Clark R.A. 1974.** Interactive effects of salinity and fertility on yields of grains and vegetables. *Agronomy Journal* 66: 412-421.
- Bernstein L., Hayward H.E. 1958.** Physiology of salt tolerance. *Annual Review of Plant Physiology* 9: 25-46.
- Bertin N., Guichard S., Leonardi C., Longuenesse J.J., Langlois D., Navez B. 2000.** Seasonal evolution of the quality of fresh glasshouse tomatoes under Mediterranean conditions, as affected by air vapour pressure deficit and plant fruit load. *Annals of Botany* 85(6): 741-750.
- Bertsch F., Carlos Hernandez J., Arguedas F., Acosta, M. 2003.** Nutrient absorption curves in two red common bean varieties, Bribri and Sacapobres. *Agronomia Costarricense* 27: 75-81.
- Bielorai H., Vaisman I., Felgini A. 1984.** Drip irrigation of cotton with treated municipal effluents: I yield response. *Journal of Environmental Quality* 13:231-234
- Bole J.B., Bell R.G. 1978.** Land application of municipal sewage waste water: yield and chemical composition of forage crops. *Journal of Environmental Quality* 7: 222-226.
- Botella M.A., Martínez V., Pardines J., Cerda A. 1997.** Salinity induced potassium deficiency in maize plants. *Journal Plant Physiology* 150: 200-205.

- Botía P., Navarro J.M., Cerdá A., Martínez V. 2005.** Yield and fruit quality of two melon cultivars irrigated with saline water at different stages of development. *European Journal of Agronomy* 23(3): 243-253.
- Bouwer H., Idelovitch E. 1987.** Quality requirements for irrigation with sewage water. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 113: 516-535.
- Bradford K.J., May D.M., Hoyle B.J., Skibinski Z.S., Scott S.J., Tyler K.B. 1988.** Seed and soils treatment to improve emergence of muskmelon from cold or crusted soils. *Crop Science* 28(6): 1001-1005.
- Brenner A., Shandalov S., Messalem R., Yakirevich A., Oron G., Rebhun M. 2000.** Wastewater reclamation for agricultural reuse in Israel: Trends and experimental results. *Water, Air, and Soil Pollution* 123(1-4): 167-182.
- Bryson G.M., Barker A.V. 2002.** Sodium accumulation in soils and plants along Massachusetts roadsides. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 33(1-2): 67-78.
- Buitink J., Hoekstra F.A., Hemminga M.A. 2000.** A critical assessment of the role of oligosaccharides in intracellular glass stability. *Seed Biology* 461-466.
- Buran H.G., Sheik B. Cort R.P., Cooper H.C., Rifle D. 1987.** Reclaimed water for irrigation of vegetables eaten raw. *California Agriculture* 41: 4-7.
- Buzetti S., Hernandez F.B.T., Sá M.E., Suzuki M.A. 1993.** Influência da adubação nitrogenada e potássica na eficiência do uso da água e na qualidade de frutos de melão. *Scientia Agrícola, Piracicaba* 50(2): 419-426.
- Cabrera R.I. 2003.** Growth, quality and nutrient responses of Azalea hybrids to salinity. *Acta Horticulturae* 609: 241-245.
- Cachorro P., Ortiz A., Cerdá A. 1994.** Implications of calcium nutrition on the response of *Phaseolus vulgaris* L. to salinity. *Plant and Soil* 159(2): 205-212.
- Cadahía C. 1968.** El análisis de savia como índice de la influencia del NaCl en la nutrición de las tomateras. En: Control de la Fertilización en las plantas cultivadas. II Coloquio Europeo y Mediterráneo. Sevilla (España), 717-732.
- Cadahía C., Sarro M.J., Garate A., Masaguer A., Peñalosa J., de la Torre F., Lucena J.J., Segura M.L., García M. 1988.** Fertilización en riego por goteo de cultivos horticolas. Mundi-Prensa (ed.), 234 pp.
- Cadahía C., Sarro M.J., Vallejo A., Penalosa J. 1984.** Evaluación del antagonismo Na/Ca en el sistema suelo calizo-planta. Extracción por electrodialisis. *Actas Proceedings* 1: 936-100. Montpellier, France.
- Cajamar y la Diputación Provincial de Almería. 2003.** Investigación de las características hidrológicas e hidrodinámicas del Campo de Níjar. Informe elaborado por Carrión Dacosta y asociados S.L. y Aljibe Consultores S.L.
- Cajamar. 2003.** Estudio hidrogeológico e isotópico de los sistemas de acuíferos del sur de la sierra de Gádor-Campo de Dalías. Informe elaborado por el grupo de investigación Recursos Hídricos y Geología Ambiental del Dpto. de Hidrología y Química Analítica de la Universidad de Almería
- Camacho F. 2003.** Técnicas de Producción en Cultivos Protegidos. Instituto de Estudios de Cajamar, Almería (España). 784 pp.

- Candela L., Fabregat S., Josa A., Suriol J., Mas J., Vignes N. 2007.** Assesment of soil and ground - water impacts by treated urban wastewater reuse. A case study: application in a golf course (Girona, Spain). *Science of Total Environment* 374: 26-35.
- Caraciolo L.M., Allgretti L., Bernardo C., Robles A. 2002.** Efecto de diferentes niveles de salinidad sobre el crecimiento de *Atriplex lampa*. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias* 34(2): 101-106.
- Carden D.E., Walker D.J., Flowers T.J., Miller A.J. 2003.** Single-cell measurements of the contributions of cytosolic Na⁺ and K⁺ to salt tolerance. *Plant Physiology* 131: 676- 683.
- Carmassi G., Incrocci L., Maggini R., Malorgio F., Tognoni F., Pardossi A. 2007.** An aggregated model for water requirements of greenhouse tomato grown in closed rockwool culture with saline water. *Agricultural Water Management* 88(1): 73-82.
- Carvajal M., Martínez V., Cerda A. 1999.** Influence of magnesium and salinity on tomato plants grown in hydroponic culture. *Journal of Plant Nutrition* 22: 177-190.
- Casas A. 1999.** Solución nutritiva: principios básicos. Comportamiento e interacción de los distintos elementos. En: *Cultivo sin suelo II*. M. Fernández y I. M. Cuadrado (eds). Dirección General de Investigaciones y Formación Agraria. FIAPA. Caja Rural de Almería. España. pp. 245- 262
- Castellanos M.T., Cabello M.J., Cartagena M.C., Tarquis A.M., Arce A., Ribas F. 2012.** Nitrogen uptake dynamics, yield and quality as influenced by nitrogen fertilization in ‘Piel de sapo’ melon. *Spanish Journal of Agricultural Research* 10(3): 756-767.
- Castellanos M.T., Cartagena M.C., Ribas F., Cabello M.J., Arce A., Tarquis A.M. 2010.** Efficiency Indexes for Melon Crop Optimization. *Agronomy Journal* 102:716-722.
- Cayuela E., Perez-Alfocea F., Caro M., Bolarin M.C. 1996.** Priming of seed with NaCl induces physiological changes in tomato plants grown under in salt stress. *Physiologia Plantarum* 96(2):231-236.
- Cerda A., Martinez V. 1988.** Nitrogen fertilization under saline conditions in tomato and cucumber plants. *Journal of Horticultural Science* 63(3): 451-458.
- Cerezo M., García-Agustín P., Serna M., Primo-Millo E. 1997.** Kinetics of nitrate uptake by citrus seedlings and inhibitory effects of salinity. *Plant Science* 126: 105-112.
- Céspedes A.J., García M.C., Pérez-Parra J.J., Cuadrado I.M. 2009.** Caracterización de la explotación hortícola protegida Almeriense. Fundación para la Investigación Agraria en la Provincia de Almería (FIAPA), Almería, España.
- Chalkoo S., Sahay S., Inam A., Iqbal S. 2014.** Application of Wastewater Irrigation on Growth and Yield of Chilli Under Nitrogen and Phosphorus Fertilization. *Journal of Plant Nutrition* 37(7): 1139-1147.
- Chapagain B.P., Wiesman Z. 2004.** Effect of potassium magnesium chloride in the fertigation solution as partial source of potassium on growth, yield, and quality of greenhouse tomato. *Scientia Horticulturae* 99:279-288.
- Chapagain B.P., Wiesman Z., Zaccai M., Imas P., Magen H. 2003.** Potassium chloride enhances fruit appearance and improves quality of fertigated greenhouse tomato as compared to potassium nitrate. *Journal of Plant Nutrition* 26(3): 643-658.
- Cheeseman J.M. 1988.** Mechanisms of salinity tolerance in plants. *Plant Physiology* 87: 547-550.

- Chen W., Hou Z., Wu L., Liang Y., Wei C. 2009.** Effects of salinity and nitrogen on cotton growth in arid environment. *Plant and Soil* 32(6):61–73.
- Choi J.M., Lee C.W. 2012.** Influence of elevated phosphorus levels in nutrient solution on micronutrient uptake and deficiency symptom development in strawberry cultured with fertigation system. *Journal of Plant Nutrition* 35(9): 1349-1358.
- Coelho E.F., Sousa V.F., Sousa V.A., Melo F.B. 2001.** Efeitos de níveis de N e K aplicados por gotejamento na cultura do meloeiro (*Cucumis melo* L.) em solo arenoso. *Ciência e Agrotecnologia, Lavras* 25 (1): 23–30.
- Cohen Y. 2003.** Respuestas fisiológicas a la utilización de aguas salinas. Curso Superior de Especialización – Mejora de la eficiencia en el uso del agua en cultivos protegidos. Dirección General de Investigación y Formación Agraria de la Junta de Andalucía. 147 pp.
- Coïc Y., Lesaint C. 1975.** La nutrition minérale et en eau des plantes en horticulture avancée. Le document Technique de la S.C.P.A. Mouhouse (France). 22 pp.
- Çolpan E., Zengin M., Özbahçe A. 2013.** The effects of potassium on the yield and fruit quality components of stick tomato. *Horticulture, Environment, and Biotechnology* 54(1): 20-28.
- Consejería de Agricultura y Pesca (CAP). 2008.** Estadística de producciones agrarias. Disponible en <http://www.cap.junta-andalucia.es/agriculturaypesca>
- Consejería de Agricultura y Pesca (CAP). 2009.** Anuario de estadísticas Agrarias y Pesqueras de Andalucía 2006. Junta de Andalucía.
- Consejería de Agricultura, Pesca y Desarrollo Rural (CAPDR). 2014.** Boletín Final. Avance de la Valoración de Campaña 2013/14. Hortalizas protegidas. Almería. 36pp.
- Consejería de Medio Ambiente (CMA). Secretaría General de Agua. 2011.** Balance de cumplimiento del acuerdo andaluz por el agua. Junta de Andalucía. 24pp.
- Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio (CMAOT). 2012.** Demarcación Hidrográfica de las Cuencas Mediterráneas Andaluzas. Documentos plan hidrológico de la demarcación hidrográfica de las cuencas mediterráneas andaluzas. Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio. Junta de Andalucía
- Contreras J. I., Segura M. L., Galindo P., Catalá J.J. 2006.** Response of greenhouse pepper crop to fertilizer and different qualities of irrigation water. *Acta Horticulturae* 700:203–206.
- Contreras J.I. 2001.** Efectos del uso de agua residual depurada sobre suelo y cultivo en invernaderos de Almería. Proyecto Monográfico Ingeniería Técnica Agrícola en Mecanización y Construcciones Rurales. Escuela Superior de Ingeniería. Universidad de Almería.
- Contreras J.I., Eymar E., Lopez J.G., Lao M.T., Segura M.L. 2013a.** Influences of Nitrogen and Potassium Fertigation on Nutrient Uptake, Production, and Quality of Pepper Irrigated with Disinfected Urban Wastewater. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 44:767–775.
- Contreras J.I., Lao M.T., Segura M.L. 2014a.** Producción y absorción de macronutrientes del cultivo de melón en invernadero bajo diferentes dosis NK y salinidad del agua. *Actas de Horticultura* 66: 65-71.

- Contreras J.I., López J.G., Lao M.T., Eymar E., Segura M.L. 2013b.** Dry-Matter Allocation and Nutrient Uptake Dynamic in Pepper Plant Irrigated with Recycled Water by Different Nitrogen and Potassium Rate. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 44:758–766.
- Contreras J.I., López-Segura J.G., Eymar E., Segura M.L. 2012b.** Influence of urban wastewater purified and NK fertilization on greenhouse pepper yield and quality. *Acta Horticulturae* 927:827-834
- Contreras J.I., López-Segura J.G., Galindo P., Catalá J.J., Segura M.L. 2007.** Efecto de la fertirrigación NK y la calidad del agua de riego sobre la producción y extracciones nutricionales de melón en invernadero. *Actas de Horticultura* 49: 93-99.
- Contreras J.I., Martín F., Baeza, R. 2014b.** Caracterización de los bulbos húmedos generados en suelos enarenados en los invernaderos del campo de Dalías (Almería). XXXII Congreso Nacional de Riegos. Madrid 16-18 de Junio de 2014. Trabajo A-12, 8pp.
- Contreras J.I., Martínez J., Alcaide M., Pérez J., Roldán, J. 2002.** Influencia del sistema de riego localizado enterrado en la utilización de agua residual depurada para riego de hortalizas. XX Congreso Nacional de Riegos. Ciudad Real 12-14 junio, pp.75-77.
- Contreras J.I., Plaza B.M., Lao M.T., Segura M.L. 2012a.** Growth and Nutritional Response of Melon to Water Quality and Nitrogen Potassium Fertigation Levels under Greenhouse Mediterranean Conditions. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 43:434-444.
- Conversa G., Lazzizzera C., Bonasia A., Elia A. 2013.** Yield and phosphorus uptake of a processing tomato crop grown at different phosphorus levels in a calcareous soil as affected by mycorrhizal inoculation under field conditions. *Biology and Fertility of Soils* 49(6): 691-703.
- Cooper A.J. 1977.** Nutritional control of a nutrient film tomato. *Scientia Horticulturae* 7: 189-195.
- Cordonnier M. J., Johnston T.J. 1980.** Soybean growth and development as affected by irrigation with municipal wastewater and well water. In *Agronomy Abstracts. 72nd annual meeting, American Society of Agronomy*. American Society of Agronomy.
- Corominas J. 2001.** El Plan Hidrológico Nacional en Andalucía y la directiva marco sobre política de aguas. In *Una cita europea con la nueva cultural del agua: la directiva marco: perspectivas en Portugal y España: II Congreso Ibérico sobre Planificación y Gestión de Aguas* (pp. 313-330). Institución Fernando el Católico.
- Cramer G.R. 1992.** Kinetics of maize leaf elongation. 2. Responses of a Na⁺ excluding cultivar and a Na⁺ including cultivar to varying Na⁺/Ca²⁺ salinities. *Journal of Experimental Botany* 43: 857-864.
- Cramer G.R. 2002.** Sodium-calcium interactions under salinity stress. In: Läuchli, M. and Lüttge, U. (eds.). *Salinity: Environment-Plants-Molecules*. Kluwer Academic Publishers. London. 205-228 pp.
- Crook J. 1991.** Quality criteria for reclaimed water. *Water Science and Technology* 24(9): 109-121.
- Cuartero J., Fernández R. 1999.** Tomato and salinity. *Scientia Horticulturae* 78(1-4): 83-125.
- Cushman J.C., Meyer G., Michalowski C.B., Schmitt J.M., Bohnert H.J. 1989.** Salt stress leads to differential expression of two isogenes of phosphoenolpyruvate carboxylase

- during Crassulacean acid metabolism induction in the common ice plant. *The Plant Cell Online* 1(7): 715-725.
- Davies J.N., Hobson G.E. 1981.** The constituents of tomato fruit–The influence of environment, nutrition, and genotype. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 15: 205-280.
- Davies J.N., Winsor G.W. 1967.** Effect of nitrogen, phosphorus, potassium, magnesium and liming on the composition of tomato fruit. *Journal of the Science of Food and Agricultural* 18: 459-466.
- De la Torre F. 1984.** Estudio de la fertigación del tomate en cultivos enarenados con riego por goteo. Tesina de Licenciatura. Universidad Politécnica de Madrid.
- Debouba M., Maâroufi-Dghimi H., Suzuki A., Ghorbel M.H., Gouia, H. 2007.** Changes in growth and activity of enzymes involved in nitrate reduction and ammonium assimilation in tomato seedlings in response to NaCl stress. *Annals of botany* 99(6): 1143-1151.
- Del Amor F.M. 2007.** Yield and fruit quality response of sweet pepper to organic and mineral fertilization. *Renewable Agriculture and Food Systems* 22(03): 233-238.
- Del Amor F.M., Serrano-Martínez A., Fortea M.I., Leguac P., Núñez-Delicado E. 2008.** The effect of lant- associative bacteria (*Azospirillum* and *Pantoea*) on the fruit quality of sweet pepper under limited nitrogen supply. *Scientia Horticulturae* 117 (3): 191–196.
- Demiral M.A., Köseoglu, A.T. 2005.** Effect of potassium on yield, fruit quality, and chemical composition of greenhouse-grown *Galia melon*. *Journal Plant Nutrition* 28: 93–100.
- Deng L.S., Lin C.L., Gong, L., Li Z.H., Tu, P.F., Zhang, C.L. 2010.** Effect of Different Potassium Fertilizers on Growth and Production of Potato Under Fertigation. *Journal of South China Agricultural University* 2: 005.
- Dirección General de Investigación y Formación Agraria (DGIEA). 1991.** Estudio agua-suelo de la provincia de Almería.
- Dobermann A. 2007.** Nutrient use efficiency–measurement and management. *Fertilizer best management practices* 1.
- Dorais M., Ehret D.L., Papadopoulos A.P. 2008.** Tomato (*Solanum lycopersicum*) health components: From the seed to the consumer. *Phytochem Reviews* 7: 231-250.
- Dorais M., Papadopoulos A.P. 2000.** Greenhouse tomato fruit quality. *Horticultural Reviews* 29: 239-319.
- Dorais M., Papadopoulos A.P., Gosselin A. 2001.** Influence of electric conductivity management in greenhouse tomato yield and fruit quality. *Agronomy* 21: 367-383.
- Durham B., Angelakis A.N., Wintgens T., Thoeye C., Sala L. 2005.** Water recycling and reuse. Trends And challenges. Technical Workshop: The integration of reclaimed water in water resource Management. Lloret de Mar, Girona. España.
- Eissa H.A., Mostafa B.E., Hussein A.S. 2007.** Capsaicin content and quality characteristics in different local pepper varieties (*Capsicum annum*) and acid-brine pasteurized puree. *Journal of Food Technology* 5(3): 246-255.
- El-Gizawy A M., Adams P. 1986.** Effect of temporary calcium stress on the calcium status of tomato. *Acta Horticulturae* 178: 37-43.

- Elia A., Conversa G. 2012.** Agronomic and physiological responses of a tomato crop to nitrogen input. *European Journal of Agronomy* 40: 64-74.
- El-Nemr M.A., El-Desuki M., El-Bassiony A.M., Fawzy Z.F. 2012.** Response of growth and yield of cucumber plants (*Cucumis sativus* L.) to different foliar applications of humic acid and bio-stimulators. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences* 6(3): 630-637.
- Elumalai M., Antunes C., Guilhermino L. 2002.** Effects of single metals and their mixtures on selected enzymes of *Carcinus maenas*. *Water, Air, and Soil Pollution* 141(1-4): 273-280.
- Environmental Protection Agency (EPA). 1992.** Manual guidelines for water reuse. EPA/625/R, 92/004, Washington DC, US Environmental Protection Agency, US Agency for International Development, XIII.
- Enzo M., Giaquinto G., Lazzarin R., Pimpini F., Sambo, P. 2001.** Principitecnico-agronomici della fertirrigazione e del fuorisuolo. *Veneto Agricoltura*. 204 pp.
- Escudero J. 1993.** Cultivo hidropónico en tomate. En: Curso Superior de Especialización sobre Cultivos sin Suelo. F. Canovas y J.R. Diaz (eds.). IEA/FIAPA, Almería: 261-297.
- España. Ley 10/2001, de 5 de julio,** del Plan Hidrológico Nacional. Boletín Oficial del Estado (BOE), 6 de julio de 2001, núm. 161, pp. 24228-24250.
- España. Ley 11/2005, de 22 de junio,** por la que se modifica la Ley 10/2001, de 23 de junio, del Plan Hidrológico Nacional. Boletín Oficial del Estado (BOE), 28 de julio de 2011, núm. 149, pp. 21846-21855.
- España. Real Decreto 1315/1992, de 30 de octubre,** por el que se modifica parcialmente el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, que desarrolla los títulos preliminar, I, IV, V, VI y VII de la Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas, aprobado por el Real Decreto 849/1986, de 11 de abril. Boletín Oficial del Estado (BOE), 1 de diciembre de 1992, núm. 288, pp. 40563- 40565.
- España. Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero,** por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano. Boletín Oficial del Estado (BOE), 21 de febrero de 2003, núm. 45, pp. 7228- 7245.
- España. Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre,** por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas. Boletín Oficial del Estado (BOE), 8 de diciembre de 2007, núm. 294, pp. 50639-50661.
- Esteller M., Duran A., Morell I., García-Agustín P., Lapeña L. 1994.** Experimental citrus irrigation with reclaimed wastewater on a Spanish coastal aquifer. In: *Groundwater, Drought, Pollution and Management*. C. Reeve and W. Watts (eds), Rotterdam.
- Fageria N.K. 2014.** Growth, Nutrient Uptake and Use Efficiency in Dry Bean in Tropical Upland Soil. *Journal of Plant Nutrition* 37(12): 2085-2093.
- Fageria N.K., Baligar V.C. 2001.** Improving nutrient use efficiency of annual crops in Brazilian acid soils for sustainable crop production. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 32(7-8): 1303-1319.
- Fageria N.K., Baligar V.C. 2005.** Enhancing nitrogen use efficiency in crop plants. *Advances in Agronomy* 88: 97-185.

- Fageria N.K., Baligar V.C., Jones C.A. 2011.** *Growth and mineral nutrition of field crops*. CRC Press.
- Fageria N.K., Baligar V.C., Li Y.C. 2008.** The role of nutrient efficient plants in improving crop yields in the twenty first century. *Journal of Plant Nutrition* 31(6): 1121-1157.
- Fageria N.K., Baligar, V.C. 2003.** Methodology for evaluation of lowland rice genotypes for nitrogen use efficiency. *Journal of Plant nutrition* 26(6): 1315-1333.
- Fageria N.K., Slaton N.A., Baligar V.C. 2003.** Nutrient management for improving lowland rice productivity and sustainability. *Advances in Agronomy* 80: 63-152.
- Falkiner R.A., Smith, C.J. 1997.** Changes in soil chemistry in effluent-irrigated *Pinus radiata* and *Eucalyptus grandis* plantations. *Australian Journal of Soil Research* 35(1): 131-147.
- Fan X.H., Tang C., Rengel Z. 2002.** Nitrate uptake, nitrate reductase distribution and their relation to proton release in five nodulated grain legumes. *Annals of Botany* 90(3): 315-323.
- Feigi A., Vaisman I., Bielorai H. 1984.** Drip irrigation of cotton with treated municipal effluents: II nutrient availability in soil. *Journal of Environmental Quality* 13: 234-238
- Feigin A. 1985.** Fertilization management of crops irrigated with saline water. In *Biosalinity in Action: Bioproduction with Saline Water* (pp. 285-299). Springer Netherlands.
- Feleafel M. N., Mirdad Z.M. 2014.** Alleviating the Deleterious Effects of Water Salinity on Greenhouse Grown Tomato. *International Journal of Agriculture and Biology* 16: 49-56.
- Ferguson L., Grattan S.R. 2005.** How salinity damages citrus: osmotic effects and specific ion toxicities. *HortTechnology* 15: 95-99.
- Fernández J., García M., Maldonado J. 2008.** Absorción y transporte de elementos minerales. En: *Fundamentos de fisiología vegetal*. J. Azcón-Bieto y M. Talón (eds). McGraw-Hill. Madrid. pp: 123-143.
- Fernández M., Martín E., Cánovas G., Baeza R. 2012.** Manejo controlado de la aplicación de nitratos en cultivos de tomate y pimiento en invernadero. *Vida Rural* 343: 38-44.
- Fichera P., Di Giorgi M.C. 1964.** Nuovi orientamenti sull'utilizzazione delle acque saline. I. L'influenza del rapporto potassio-sodio su colture salino-sensibili (*Phaseolus vulgaris* L.). *Agrochimica* XII (5):470-476.
- Fisher K.J., Johnstone P.R., Nichols M.A. 2002.** Nutrition of processing tomatoes. *Acta Horticulturae* 571: 45-49.
- Flexas J., Bota J., Cifre J. 2004.** Understanding down regulation of photosynthesis under water stress, future prospects and searching for physiological tools for irrigation management. *Annals of Applied Biology* 144: 273-283.
- Flexas J., Ribás-Carbo M., Díaz-Espejo A., Galmes J., Medrano H. 2008.** Mesophyll conductance to CO₂: Current knowledge and future prospects. *Plant, Cell and Environment* 31: 602-621.
- Flores P., Botella M.Á., Cerdá A., Martínez V. 2004.** Influence of nitrate level on nitrate assimilation in tomato (*Lycopersicon esculentum*) plants under saline stress. *Canadian Journal of Botany* 82(2): 207-213.
- Flower T.J., Colmer T.D. 2008.** Salinity tolerance in halophytes. *New Phytology* 179: 945-963.

- Flowers T.J. 2004.** Improving crop salt tolerance. *Journal of Experimental Botany* 55: 307-319.
- Fonseca A.F, Herpin U., Paula A.M., Victória R.L., Melfi A.J. 2007.** Agricultural use of treated sewage effluents: agronomic and environmental implications and perspectives for Brazil. *Scientia Agricola* 64(2): 194-209
- Fonseca A.F., Melfi A.J., Montes C.R. 2005.** Maize growth and changes in soil fertility after irrigation with treated sewage effluent. I. Plant dry matter yield and soil nitrogen and phosphorus availability. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 36: 1965-1981.
- Fontes P.C.R., Dias E.N., Graca R.N. 2005.** Nutrient uptake curves and a method to estimate nitrogen and potassium rates in sweet pepper fertigation. *Horticultura Brasileira* 23 (2): 275-280.
- Fontes P.C.R., Loures J.L., Mantovani E.C., Silva Filho J.B.D. 2014.** Leaf Nutrient Content and Tomato Fruit Yield as Affected by Single Super Phosphate Rates Applied by Drip Irrigation. *Journal of Plant Nutrition* 37(2): 259-269.
- Foolad M.R. 1997.** Genetic basis of physiological traits related to salt tolerance in tomato, *Lycopersicon esculentum* Mill. *Plant Breeding* 116: 53-58.
- Fox L.J., Grose J.N., Appleton B.L., Dohou, S.J. 2005.** Evaluation of treated effluent as an irrigation source for landscape plant. *Journal of Environmental Horticulture* 23: 174-178.
- Galdeano-Gómez E., Aznar-Sánchez J.A., Pérez-Mesa J.C. 2013.** Sustainability dimensions related to agricultural-based development: the experience of 50 years of intensive farming in Almería (Spain). *International Journal of Agricultural Sustainability* 11(2), 125-143.
- Gallardo M., Thompson R.B., Giménez C., Padilla F.M., Stöckle C.O. 2014.** Prototype decision support system based on the VegSyst simulation model to calculate crop N and water requirements for tomato under plastic cover. *Irrigation Science* 32(3): 237-253.
- Gallardo M., Thompson R.B., Rodríguez J.S., Rodríguez F., Fernández M.D., Sánchez J.A., Magán, J.J. 2009.** Simulation of transpiration, drainage, N uptake, nitrate leaching, and N uptake concentration in tomato grown in open substrate. *Agriculture Water Management* 97: 1 773-1 784.
- García J. 1997.** Riego con aguas residuales tratadas. Catalunya Rural i Agraria. Boletín informativo del Departament d'Agricultura, Ramaderia i Pesca, Generalitat de Catalunya 31: 58-63.
- García M., Segura M.L. 1984.** Ensayo de diferentes preparaciones de suelo (V). *Boletín Informativo* 8: 29-52. Centro de Investigación y Desarrollo Hortícola. Consejería de Agricultura y Pesca. Almería.
- Garg A., Chaffin D.B., Freivalds, A. 1982.** Biomechanical stresses from manual load lifting: a static vs dynamic evaluation. *IIE transactions*, 14(4), 272-281.
- Gastal F., Lemaire G. 2002.** N uptake and distribution in crops: an agronomical and ecophysiological perspective. *Journal of Experimental Botany* 53(370): 789-799.
- Geraldson C.M. 1985.** Potassium nutrition of vegetable crops. In *Potassium in agriculture*, ed. R. S. Munson, 915-927. Madison, Wisc.: ASACSSA-SSSA.

- Ghonomie A.A., El-Bassiouny A.M., Abdel-Mawgoud A.M.R., El-Tohamy W.A., Gruda N. 2012.** Growth, Yield and Blossom-End Rot Incidence in Bell Pepper as Affected by Phosphorus Level and Amino Acid Applications. *Gesunde Pflanzen* 64(1): 29-37.
- Gianquinto G., Muñoz P., Pardossi A., Ramazzotti S., Savvas D. 2013.** Soil fertility and plant nutrition. In: Good Agricultural Practices for greenhouse vegetable crops. Principles for Mediterranean climate areas. FAO Plant Production and Protection Paper 217:205-270.
- Gil C., Ramos J., Boluda R., Picazo P. 2003.** Caracterización físicoquímica y evaluación del estado general de los suelos en invernaderos del poniente almeriense. Almería, Spain: FIAPA.
- Giménez C., Gallardo M., Martínez-Gaitán C., Stöckle C.O., Thompson R B., Granados M.R. 2013.** VegSyst, a simulation model of daily crop growth, nitrogen uptake and evapotranspiration for pepper crops for use in an on-farm decision support system. *Irrigation Science* 31 (3): 465-477.
- Giuffrida F., Cassaniti C., Leonardi C. 2014.** Tomato and eggplant scions influence the effect of rootstock under Na₂SO₄ salinity. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Soil and Plant Science*, 1-10.
- Giuffrida F., Leonardi C. 2012.** Nutrient solution concentration on pepper grown in a soilless closed system: yield, fruit quality, water and nutrient efficiency. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Soil and Plant Science* 62(1): 1-6.
- Glass A.D. 2003.** Nitrogen use efficiency of crop plants: physiological constraints upon nitrogen absorption. *Critical Reviews in Plant Sciences* 22(5): 453-470.
- Goldberg D., Gorna B., Bar Y. 1971.** The distribution of roots, water and minerals as a result of trickle irrigation. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 96(5): 645-648.
- Goldberg D., Shmueli M. 1970.** Drip irrigation-a method used under arid and desert conditions of high water and soil salinity. *American Society of Agricultural Engineers Trans Asae*.
- Goldberg S.D., Ben-Asher J., Gornat B. 1976.** Soil and plant water status under sprinkling and trickling. *Agricultural Water Management* 1(1): 33-40.
- Gornat B., Goldberg D., Rimón D., Ben Asher J. 1973.** The physiological effect of water quality and method of application on tomato, cucumber, and pepper. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 96(2): 202-205.
- Gough C., Hobson G.E. 1990.** A comparison of the productivity, quality, and shelf life characteristics and consumer reaction to the crop from cherry tomato plant grown at different levels of salinity. *Journal of Horticultural Science* 65:431-439.
- Granados M.R. 2011.** Lixiviación de Nitratos desde Cultivo de Invernadero en Suelo en las Condiciones de Almería: Magnitud, Factores Determinantes y Desarrollo de un Sistema de Manejo Optimizado. Tesis Doctoral. Universidad de Almería. 311 pp.
- Granados M.R., Thompson R.B., Fernández M.D., Martínez-Gaitán C., Gallardo M. 2013.** Prescriptive-corrective nitrogen and irrigation management of fertigated and drip-irrigated vegetable crops using modeling and monitoring approaches. *Agricultural Water Management* 119: 121-134.

- Gratieri L.A., Cecílio Filho A.B., Barbosa J. C., Pavani L.C. 2013.** Nitrogen and Potassium Concentrations in the Nutrients Solution for Melon Plants Growing in Coconut Fiber without Drainage. *The Scientific World Journal*.
- Grattan S.R., Grieve C.M. 1999.** Salinity-mineral nutrient relations in horticultural crops. *Scientia Horticulturae* 78: 27-157.
- Graves C.J. 1983.** The nutrient film technique. *Horticultural Reviews* 5: 1-44.
- Greenway H., Munns R. 1980.** Mechanisms of salt tolerance in non halophytes. *Annual Review of Plant Physiology* 31: 149-190.
- Grieve C.M., Maas E.V. 1988.** Differential effects of sodium/calcium ratio on sorghum genotypes. *Crop Science* 29: 659- 665.
- Grindlay D.J.C. 1997.** Towards an explanation of crop nitrogen demand based on the optimization of leaf nitrogen per unit leaf area. *Journal of Agricultural Science, Cambridge* 128:377-396.
- Grobbelar H.L., Lourens F. 1975.** Fertilizer applications with drip irrigation. Agriplas (Pty) Limited, P.O. Box 261, Kasselsvlei. Cape Province, Republic of South Africa.
- Gruda N. 2005.** Impact of environmental factors on product quality of greenhouse vegetables for fresh consumption. *Critical Reviews in Plant Sciences* 24(3): 227-247.
- Guerrier G. 1996.** Relation between tolerance to NaCl and photosynthetic capacity and inorganic solute levels in *Lycopersicon pennellii* and *L. esculentum* vitro plants. *Agrochemica* 40: 263-275.
- Guertal E.A. 2006.** Phosphorus movement and uptake in bermudagrass putting greens. *USGA Turfgrass and Environmental Research Online* 5(12): 1-7.
- Gueta-Dahan Y., Yaniv Y., Zilinskas Z., Hayyim G. 1997.** Salt and oxidative stress: similar and specific responses and their relation to salt tolerance in citrus. *Planta* 203(4): 460-469.
- Gul H., Said A., Saeed B., Ahmad I., Ali K. 2011.** Response of yield and yield components of wheat towards foliar spray of nitrogen, potassium and zinc. *Journal of Agricultural and Biological Science* 6(2).
- Guzmán J.M. 2011.** Reutilización de aguas residuales para riego en agricultura. En: Sustratos, manejo del clima, automatización y control en sistemas de cultivo sin suelo, Ed. Víctor Julio Flórez Roncancio. – Bogotá : Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Agronomía. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural: Colciencias, 294 pp.
- Guzmán M., Olave J. 2006.** Response of growth and biomass production of primed melon seed (Cucumis melo L. cv. Primal) to germination salinity level and Nforms in nursery. *Journal of Food, Agriculture and Environment* 4(1): 163-165.
- Hamdy A. 2005.** Saline irrigation management for a sustainable use. In: Hamdy, A., El Gamal, F., Lamaddalena, N., Bogliotti, C. and Guelloubi, R. (eds.). Nonconventional water use: WASAMED project. Bari: CIHEAM/EU DG Research. 3-42 pp.
- Hamdy A., Abdel-Dayemb S., Abu-Zeidb M. 1993.** Saline water management for optimum crop production. *Agricultural Water Management* 24(3): 189-203.
- Hanson B., May D. 2004.** Effect of subsurface drip irrigation on processing tomato yield, water table depth, soil salinity, and profitability. *Agricultural Water Management* 68(1): 1-17.

- Hartt C.E. 1969.** Effect of potassium deficiency upon translocation of ^{14}C in attached blades and entire plants of sugarcane. *Plant Physiology* 44: 1461–1469
- Hartz T.K., Johnstone P.R., Francis D.M., Miyao E.M. 2005.** Processing tomato yield and fruit quality improved with potassium fertigation. *HortScience* 40(6): 1862-1867.
- Hartz T.K., Smith R.F., LeStrange M., Schulbach K.F. 1993.** On-farm monitoring of soil and crop nitrogen status by nitrate-selective electrode. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 24: 2607-2615.
- Hasegawa P. M, Bressan R. A., Zhu J.K., Bohnert H.J. 2000.** Plant cellular and molecular responses to high salinity. *Annual Review Plant Physiology and Plant Molecular Biology* 51: 463-499.
- Hayes A.R., Mancino C.F., Pepper I.L. 1990.** Irrigation of turfgrass with secondary sewage effluent: I. Soil and leachate water quality. *Agronomy Journal* 82: 939-943.
- He F., Chen Q., Jiang R., Chen X., Zhang F. 2007.** Yield and Nitrogen Balance of Greenhouse Tomato (*Lycopersicum esculentum* Mill.) with Conventional and Site-specific Nitrogen Management in Northern China. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 77(1): 1-14.
- Helal H.M. 1983.** Effects of sodium chloride on ionic relations, energy status and dry matter synthesis by various crop plant species. D. Sc. (Habil) thesis, Justus-Liebig University, Giessen, Germany.
- Hernando V., Cadahía C. 1973.** El análisis de savia como índice de fertilización. Manuales de Ciencia Actual. Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). Madrid, Spain
- Ho L.C. 1996.** The mechanism of assimilate partitioning and carbohydrate compartmentation in fruit in relation to the quality and yield of tomato. *Journal of Experimental Botany* 47:1239-1243.
- Hoagland D.R., Arnon D.I. 1950.** The water culture method for growing plants without soil. *California Agricultural Experiment Station, Circular* 347: 1-32.
- Hochstrat R., Wintgens T., Melin T., Jeffrey P. 2005.** Wastewater reclamation and reuse in Europe - a model-based potential estimation. *Water Supply* 5-1: 67-75.
- Hoffman G.J., Shannon M.C. 2007.** Salinity. *Developments in Agricultural Engineering* 13: 131-160.
- Hook J.E. 1981.** Movement of phosphorus and nitrogen in soil following application of municipal wastewater. In: *Chemical mobility and reactivity in soil systems*. D.W Nelson, D.E. Elrick and K.K. Tanji (eds.). Madison: Soil Science Society of America, 241-255 pp.
- Hook J.E., Kardos L.T. 1978.** Nitrate leaching during long-term spray irrigation for treatment of secondary sewage effluent on woodland sites. *Journal of Environmental Quality* 7(1): 30-34.
- Hu Y., Schmidhalter U. 1997.** Interactive effects of salinity and macronutrient level on wheat. 2. Composition. *Journal of Plant Nutrition* 20: 1169-1182.
- Hu Y., Schmidhalter U. 2005.** Drought and salinity: A comparison of their effects on mineral nutrition of plants. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 168: 541- 549.
- Huang J.W., Grunes D.L. 1992.** Effects of root temperature and nitrogen form in magnesium uptake and translocation by wheat seedlings. *Journal of Plant Nutrition* 15: 991-1005.

- Huez-Lopez M.A., Ulery A.L., Samani Z. 2011.** Response of chile pepper (*Capsicum annuum* L.) to salt stress and organic and inorganic nitrogen sources: II. Nitrogen and water use efficiencies, and salt tolerance. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 14 (3):757-763.
- Hummadi K.B., Ghliem J.D. 1984.** The influence of water salinity on growth and productivity of tomato. PhD. Tesis of Jaleel Dh. Ghliem. University of Basrah.
- Instituto Geológico y Minero de España (IGME). 1982.** Estudio hidrogeológico del Campo de Dalías (Almería). 13 Tomos. IGME, Madrid.
- Instituto Geológico y Minero de España (IGME). 2003.** Resultados del proyecto sobre conocimientos alcanzados de los acuíferos del sur de Sierra de Gádor-Campo de Dalías. Madrid, Oficina de proyectos de Almería. 27pp.
- Instituto Tecnológico Geo-Minero de España (ITGE). 1989.** Síntesis hidrogeológica del Campo de Dalías (Almería). Propuesta de primeras actuaciones de investigación y gestión. ITGE Madrid. 164 pp.
- Instituto Tecnológico Geo-Minero de España (ITGE). 1995.** Situación de los acuíferos del Campo de Dalías (Almería) en relación con su declaración de sobreexplotación. Publicado en: VI Simp. Hidrogeol. XXI, Sevilla: 443-467.
- İşeri Ö.D., Sahin F.I., Haberal M. 2014.** Sodium chloride priming improves salinity response of tomato at seedling stage. *Journal of Plant Nutrition* 37(3): 374-392.
- Ivorra R., Benabent M., Romero B., Mataix J. 1997.** Reutilización de un agua residual para riegos de campos de golf. I Congreso Ibérico y III Nacional de Fertirrigación: 928-935.
- Jahantigh M. 2008.** Impact of recycled wastewater irrigation on soil chemical properties in an arid region. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 11(18): 2264-2268.
- Javaria S., Khan M.Q., Bakhsh I. 2012.** Effect of potassium on chemical and sensory attributes of tomato fruit. *Journal of Animal and Plant Sciences* 22(4): 1081-1085.
- Jobbágy, E.G., Jackson R.B. 2001.** The distribution of soil nutrients with depth: global patterns and the imprint of plants. *Biogeochemistry* 53(1): 51-77.
- Jones J.B. 1998.** Phosphorus toxicity in tomato plants: when and how does it occur?. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 29(11-14): 1779-1784.
- Jovicich E., Cantliffe D.J., Sargent S.A., Osborne L.S. 2004b.** Production of greenhouse-grown peppers in Florida. Document HS979. The Department of Horticultural Sciences, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida <http://edis.ifas.ufl.edu/hs228>.
- Jovicich E., Cantliffe D.J., Stoffella, P.J. 2004a.** Fruit yield and quality of greenhouse-grown bell pepper as influenced by density, container, and trellis system. *HortTechnology* 14(4): 507-513.
- Kadayifci A., Tuylu G.I., Ucar Y., Cakman B. 2005.** Crop water use of onion (*Allium cepa* L.) in Turkey. *Agriculture Water Management* 72(1): 59-68.
- Kafkafi U. 1984.** Plant nutrition under saline conditions. *Soil Salinity under Irrigation: Processes and Management*. Berlin: Springer-Verlag, 319-338.
- Kafkafi U. 2005.** Global aspects of fertigation usage. In *Fertigation Proceedings, International Symposium on Fertigation*. Beijing, China (pp. 8-22).

- Kafkafi U., Bar-Yosef B. 1980.** Trickle irrigation and fertilization of tomatoes in highly calcareous soils. *Agronomy Journal* 72(6): 893-897.
- Kafkafi U., Dayan E., Akiri B. 1984.** Nitrate and phosphate uptake by tomato from nutrient solution in a commercial operation. International Society for Soilless Culture. Sixth International on soilless. Lunteren. ISOSC Proceedings: 291-298
- Kafkafi U., Valoras N., Letey J. 1982.** Chloride interaction with nitrate and phosphate nutrition in tomato (*Lycopersicon esculentum* L.). *Journal of Plant Nutrition* 5(12): 1369-1385.
- Kalavrouziotis I.K., Kanatas P.I., Papadopoulos A.H., Bladenopoulou S., Koukoulakis P.H., Leotsinides M.N. 2005.** Effects of municipal reclaimed wastewater on the macro and microelement status of soil and plants. *Fresenius Environmental Bulletin* 14(11): 1050-1057.
- Kalavrouziotis I.K., Koukoulakis P.H. 2011.** Plant nutrition aspects under treated wastewater reuse management. *Water Air Soil Pollut* 218: 445-456.
- Kalavrouziotis I.K., Robolas P., Koukoulakis P.H., Papadopoulos A.H. 2008.** Effects of municipal reclaimed wastewater on the macro and microelements status of soil and of Brassica oleracea var. italica, and Brassica oleracea var. gemmifera. *Agriculture Water Management* 95(4): 419-426.
- Kale C.K., Bal A.S. 1987.** Reuse of stabilization pond effluent for Citrus reticulata (orange), forest and road verge plants. *Water Science Technology* 19(12): 307-315.
- Kanai S., Ohkura K., Adu-Gyamfi J.J., Mohapatra P.K., Nguyen N.T., Saneoka H., Fujita K. 2007.** Depression of sink activity precedes the inhibition of biomass production in tomato plants subjected to potassium deficiency stress. *Journal of Experimental Botany* 58: 2917-2928.
- Kang J.S., Cho J.L., Yeong Y.O. 1996.** Effect of seed priming on the germinability of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill) seeds under water and saline stress. *Journal of the Korean Society of Horticultural Science* 37(4): 516-521.
- Kang M.S., Kim S.M., Park S.W., Lee J.J., Yoo K.H. 2007.** Assessment of reclaimed wastewater irrigation impacts on water quality, soil, and rice cultivation in paddy fields. *Journal of Environmental Science and Health Part A* 42(4), 439-445.
- Karley A.J., White P.J. 2009.** Moving cationic minerals to edible tissues: potassium, magnesium, calcium. *Current Opinion in Plant Biology* 12(3): 291-298.
- Kaya C., Tuna A.L., Ashraf M., Altunlu H. 2007.** Improved salt tolerance of melon (*Cucumis melo* L.) by the addition of proline and potassium nitrate. *Environmental and Experimental Botany* 60: 397-403.
- Kazemi M. 2014.** Effect of Foliar Application of Humic Acid and Calcium Chloride on tomato growth. *Bulletin of Environment, Pharmacology and Life Sciences* 3(3): 41-46.
- Keraita B., Konradsen F., Drechsel P., Abaidoo R. 2007.** Effect of low cost irrigation methods on microbial contamination of lettuce irrigated with untreated wastewater. *Tropical Med Int Health* 12(2): 15-22.
- Khan M.A., Ungar I.A., Showalter A.M. 2000.** Effects of sodium chloride treatments on growth and ion accumulation of the halophyte *Haloxylon recurvum*. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 31: 2763-2774.

- Kiba D.I., Zong, N.A., Lompo F., Jansa J., Compaore E., Sedogo P.M., Frossard E. 2012.** The diversity of fertilization practices affects soil and crop quality in urban vegetable sites of Burkina Faso. *European Journal of Agronomy* 38: 12-21.
- Kiriiwa Y., Nukaya A. 2013.** Effects of Nutrient Management on Yellow Shoulder Fruit Incidence and Carotenoid Metabolism for Tomato Grown in the Extremely Low Volume Substrate. In *International Symposium on New Technologies for Environment Control, Energy-Saving and Crop Production in Greenhouse and Plant* 1037: 1121-1126.
- Kirkby E.A., Knight A.H. 1977.** Influence of the level of nitrate nutrition on ion uptake assimilation, organic acid accumulation, and cation-anion balance in whole tomato plants. *Plant Physiology* 60: 349-353.
- Kirkham M.B. 1986.** Problems of using wastewater on vegetable crops. *Horticultural Science* 21: 24-27.
- Koo R.C.J., Zekri M. 1989.** Citrus irrigation with reclaimed municipal wastewater. *Proceedings of the Florida State Horticultural Society* 102: 52-56.
- Kopittke P.M., Menzies N.W. 2004.** Effect of pH on Na induced calcium deficiency. *Plant and Soil* 269: 119-129.
- Kouraa A., Fethi F., Fahde, A., Lahlou A., Ouazzani N. 2002.** Reuse of urban wastewater treated by a combined stabilisation pond system in Benslimane (Morocco). *Urban Water* 4(4): 373-378.
- Kreij C., Voogt W., Baas R. 1999.** Nutrient solutions and water quality for soilless cultures. Brochure. *Research Station for Floriculture and Glasshouse Vegetables* 196, Naaldwijk, The Netherlands.
- Kuscu H., Turhan A., Ozmen N., Aydinol P., Demir A.O. 2014.** Optimizing levels of water and nitrogen applied through drip irrigation for yield, quality, and water productivity of processing tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Horticulture, Environment, and Biotechnology* 55(2): 103-114
- Ladwani K.D., Ladwani K.D., Manik, V.S., Ramteke, D.S. 2012.** Impact of Domestic Wastewater Irrigation on Soil Properties and Crop Yield. *International Journal of Scientific and Research Publications* 2(10): 1-7.
- Lao M.T. 2002.** Gestión del fertirriego de los invernaderos de Almería mediante el uso de sondas de succión. PhD diss., Escuela Politécnica Superior de Ingenieros Agrónomos, Universidad de Almería, Spain.
- Lao M.T., Jiménez S. 2002.** Los suelos enarenados en el sureste español. *Vida Rural* 159: 42-44.
- Latterell J.J., Dowdy R.H., Clapp C.E., Larson W.E., Linden D.R. 1982.** Distribution of phosphorus in soils irrigated with municipal waste-water effluent: a 5-year study. *Journal of Environmental Quality* 11: 124-128.
- Laüchli A., Epstein E. 1970.** Transport of potassium and rubidium in plant root: The significance of calcium. *Plant Physiology* 45:639-641.
- Lauchli A., Epstein E. 1984.** How plants adapt to salinity. *California Agriculture* 38: 18-20.

- Läuchli A., Epstein E. 1990.** Plant response to saline and sodic conditions. In: *Agricultural Salinity Assessment and Management*. American Society of Civil Engineers (ASCE). K. K. Tanji (ed.). New York, Manuals and Reports on Engineering Practice. pp. 113-137.
- Läuchli A., Grattan S.R. 2007.** Plant growth and development under salinity stress. In: *Advances in molecular breeding toward drought and salt tolerant crops*. M.A Jenks, P.M. Hasegawa and S.M. Jam (eds.). Springer, Dordrecht. pp. 1-32.
- Lazarova V., Bahri A. 2005.** Water reuse for irrigation: agriculture, landscapes, and turf grass. CRC Press. 408 pp.
- Lazof D.B., Bernstein N. 1999.** The NaCl induced inhibition of shoot growth: The case for disturbed nutrition with special consideration of calcium. *Advances in Botanical Research* 29: 113-189.
- Le Bot J., Adamowicz S., Robin P. 1998.** Modelling plant nutrition of horticultural crops: a review. *Scientia Horticulturae* 74(1): 47-82.
- Le Bot J., Jeannequin B., Fabre R. 2001.** Impacts of N-deprivation on the yield and nitrogen budget of rockwool grown tomatoes. *Agronomie* 21(4): 341-350.
- Lee A.G. 2009.** The effects of lipids on channel function. *Journal of Biology* 8(9): 86.
- Lekchiri A. 1983.** Interactions between water and phosphate and potash fertilizers. *Nutrient Balances and the Need for the Fertilizers in Semi-arid and Arid Regions*. Int. Potash Institute. Bern, Switzerland, 305-314.
- Lemaire G., Jeuffroy M.H., Gastal F. 2008.** Diagnosis tool for plant and crop N status in vegetative stage: Theory and practices for crop N management. *European Journal of Agronomy* 28(4): 614-624.
- León A., García F., Soler J., Del Amor F., Barba E., Ruíz-Sánchez M.C., Sánchez-Blanco M.J. 1987.** Estudio de la dinámica del $N(NO_3^-)$, P y K en suelos regados por goteo. Actas I Simposio Nacional de Fertilización en Riego Localizado. Almería (España):21-28.
- Lester E.L., Jifon J.L., Makus D.J. 2010.** Impact of potassium nutrition on postharvest fruit quality: Melon (*Cucumis melo* L) case study. *Plant and Soil* 335: 117-131.
- Levine A.D., Asano T. 2004.** Recovering sustainable water from wastewater. *Environmental Science and Technology* 38(11): 201-208.
- Levitt J. 1980.** Responses of plants to environmental stresses. Volume II. Water, radiation, salt, and other stresses (No. Ed. 2). Academic Press.
- Li Y.L., Stanghellini C., Challa H. 2001.** Effect of electrical conductivity and transpiration on vegetative growth of tomato. *Scientia Horticulturae* 89: 9-21.
- Lima P.R., Carlesso R.E., Borso, A., Ecco M., Fernandes F.V.I., Rampim L., da Fonseca, P.R.E.B. 2014.** Effects of different rates of nitrogen (N) and phosphorus pentoxide (P_2O_5) on eggplant yield. *African Journal of Agricultural Research* 9 (19): 1435-1441.
- Lima, P.S., Paiva V.L., de Madeiros J.F., de Aquino B.F., da Silva J. 2007.** Yield and quality of melon fruits as a response to application of nitrogen and potassium doses. *Caatinga* 20(2): 43-49.
- Lin D., Danfeng H. 2003.** Effects of potassium levels on photosynthesis and fruit quality of muskmelon in culture medium. *Acta Horticulturae Sinica* 30(2): 221-223.

- Lin D., Huang D., Wang S. 2004.** Effects of potassium levels on fruit quality of muskmelon in soilless medium culture. *Scientia horticulturae* 102(1): 53-60.
- Liu K., Zhang T.Q., Tan C.S., Astatkie T. 2011.** Responses of fruit yield and quality of processing tomato to drip-irrigation and fertilizers phosphorus and potassium. *Agronomy Journal* 103(5): 1339-1345.
- Liu K., Zhang T.Q., Tan C.S., Astatkie T., Price G.W. 2012.** Crop and soil nitrogen responses to phosphorus and potassium fertilization and drip irrigation under processing tomato. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 93(2): 151-162.
- Llanderal A., Lao M.T., Contreras J.I., Segura M.L. 2012.** Mobility and distribution of nutrients in the root zone of mulching sandy soil with green beans crop under fertigation. XIV Symposium Hispano-Lucso de Nutrición Mineral de las plantas Nutriplanta. Nutrición Mineral aspectos fisiológicos, agronómicos y ambientales, pp. 66-72.
- Loehr R.C., Jewell W.J., Novak J.D., Clarkson W.W., Friedman G.S. 1979.** Land application of wastes (vol. 1). New York: Van Nostrand Reinhold.
- López-Gálvez J., Téllez M.M., Bretones F. 1991.** Efectos de la fertilización nitrogenada sobre la cosecha y la extracción de macronutrientes en un cultivo de judía de enrame. Actas II Congreso Nacional de Fertirrigación (SECH). Almería, Spain: FIAPA.
- Lorenzo P., Segura M.L. 1984.** Estudio de la evolución de sales en el perfil enarenado. Cultivo de melón. Centro de Investigación sobre Cultivos Hortícolas Intensivos. Consejería de Agricultura y Pesca. Almería. Sin publicar.
- Luque A., Carpena O., Cadahía C., Palomino E. 1980.** Interactionship chlonde-nitrate on nutntion of tomato plants. Procc. 5th Intern. Coii. on the control of plant nutrition. Castelfranco. Italia. 3.60-68.
- Lycoskoufis I., Mavrogianopoulos G., Savvas D., Ntatsi G. 2011.** Impact of salinity induced by high concentration of NaCl or by high concentration of nutrients on tomato plants. In *International Symposium on Advanced Technologies and Management Towards Sustainable Greenhouse Ecosystems: Greensys2011* 952: 689-696.
- Lynch J., Läuchli A. 1985.** Salt stress disturbs the calcium nutrition of barley (*Hordeum vulgare* L.). *New Phytology* 99: 345-354.
- Lynch J., Thiel G., Läuchli A. 1988.** Effects of salinity on the extensibility and Ca availability in the expanding region of growing barley leaves. *Botanica Acta* 101: 355-361.
- Maas E.V. 1986.** Salt tolerance of plants. *Application Agricultural Research* 1: 12-26.
- Maas E.V. 1990.** Crop salt tolerance. In: Tanji, K.K. (Ed.), *Agricultural Salinity Assessment and Management*. ASCE Manuals and Reports on Engineering No. 71, ASCE, New York, pp. 262-304.
- Maas E.V., Grieve C.M. 1987.** Sodium-induced calcium deficiency in saltstressed corn. *Plant, Cell and Environments* 10: 559-564.
- Maas E.V., Hoffman C. J. 1977.** Crop salt tolerance-Current assessment. *Journal Irrigation and Drainage Division. Proceedings of the American Society of Civil Engineers* 103 (IR2): 115-134.
- Maas E.V., Hoffman G.J. 1977.** Crop salt tolerance-Current assessment. *Journal of the Irrigation and Drainage Division* 103 (2): 115-134.

- Maathuis F.J., Amtmann A. 1999.** K⁺ nutrition and Na⁺ toxicity: The basis of cellular K⁺/Na⁺ ratios. *Annals of Botany* 84: 123-133.
- Maathuis F.J., Verlin D., Smith F.A., Sanders D., Fernandez J.A., Walker N.A. 1996.** The physiological relevance of Na⁺-coupled K⁺-transport. *Plant Physiology* 112(4): 1609-1616.
- Madrid R., Ferrer C., Fernando J.S. 1987.** Movilidad y distribución de iones en el suelo, mediante fertirrigación localizada, en cultivo de cítricos. Actas I Simposio Nacional de fertilización en Riego Localizado. Almería (España): 126-137.
- Magán J.J. 2005.** Respuesta a la salinidad del tomate larga vida en cultivo sin suelo recirculante en el sureste español. Tesis Doctoral, Universidad de Almería.
- Magán, J.J., Casas E., Gallardo M., Thompson R.B., Lorenzo P. 2005.** Uptake concentrations of tomato crop in different salinity conditions. *Acta Horticulturae* 697:365-369.
- Mahakum N., Beeper P.W., Burns E.E. 1979.** Acidic constituents of various tomato fruit types. *Journal of Food Science* 44: 1241-1244.
- Mahouachi J., Socorro A.R., Talón M. 2006.** Responses of papaya seedlings (*Carica papaya* L.) to water stress and rehydration: growth, photosynthesis and mineral nutrient imbalance. *Plant Soil* 281: 137-146.
- Majid F., Jalal M., Munir H. 2010.** Effect of N, P, K concentrations on yield and fruit quality of tomato (*Solanum Lycopersicum* L.) in tuff culture. *Journal of Central European Agriculture* 11(2): 179-184.
- Malcolm C.V. 1983.** Wheatbelt salinity- a review of the saltland problem in South-Western Australia. Western Australian Department of Agriculture, Technical Bulletin 52. Department of Agriculture
- Malorgio, F., Incrocci L., Carmassi G., Pardossi A., Tognoni F. 2001.** Accumulo di Sali (NaCl) e consumo minerale in pomodoro coltivato in sistemi idroponici a ciclo chiuso. *Italus Hortus* 8 (6): 43-48.
- Maloupa E., Papadopoulos A., Pateras D. 1999.** Wastewater re-use in horticultural crops growing in soil and soilless media. *Acta Horticulturae* 481:603-607
- Mañas P., Castro E., de las Hera J. 2009.** Irrigation with treated wastewater: effects on soil, lettuce (*Lactuca sativa* L.) crop and dynamics of microorganisms. *Journal of Environmental Science and Health Part A* 44(12): 1261-1273.
- Mane A.V., Deshpande T.V., Wagh V.B., Karadge B.A, Samant J.S. 2011a.** A critical review on physiological changes associated with reference to salinity. *International Journal of Environmental Sciences* 1(6): 1192-1216.
- Mane A.V., Saratale G. D., Karadge B. A., Samant J.S. 2011b.** Studies on the effects of salinity on growth, polyphenol content and photosynthetic response in *Vetiveria zizanioides* (L.) Nash. *Emirates Journal of Food and Agriculture* 23(1): 59-70.
- Mangal J.L., Hooda P.S., Lal S. 1988.** Salt tolerance of five muskmelon cultivars. *Journal of Agricultural Science* 110: 641-643.
- Maroto J.V. 1990.** Elementos de Horticultura General. Ed. Mundi-Prensa, Madrid. 343 pp.
- Marschner H. 1995.** Mineral Nutrition in Higher Plants. New York. Academic Press. 889 pp.

- Martí H.R., Mills H.A. 1991.** Nutrient uptake and yield of sweet pepper as affected by stage of development and N form. *Journal of Plant Nutrition* 14 (11): 1165-1175.
- Martín E., Contreras J.I., Segura M.L. 2014.** Fertirrigación de judía con agua regenerada: Efecto sobre propiedades químicas del suelo y producción de fruto. XXXII Congreso Nacional de Riegos. Madrid 16-18 de Junio de 2014. Trabajo B1-01, 6pp.
- Martínez A. 1988.** Influencia de la técnica del "enarenado" en la Utilización de aguas salinas en el riego. aguas.igme.es/igme/publica/pdf/3/pdf/lib26/26a_po.pdf
- Martínez E., García M. 1993.** Cultivos sin suelo: hortalizas en clima mediterráneo. Compendios de Horticultura, 3. Díaz Santos (ed.)
- Martínez F.J. 2011.** Estudio de la huella energética del abastecimiento urbano de agua de la provincia de Almería. Trabajo de Investigación Máster. Departamento de Hidrogeología, Universidad de Almería.
- Martínez S. 2005.** Utilización de aguas residuales depuradas para riego de cultivos hortícolas bajo invernadero. Tesis Doctoral. Universidad de Almería, Spain
- Martínez S., Suay R., Moreno J., Segura M.L. 2013.** Reuse of tertiary municipal wastewater effluent for irrigation of *Cucumis melo* L. *Irrigation Science* 31(4): 661-672.
- Martínez V., Berstein N., Läuchli A. 1996.** Salt-induced inhibition of phosphorous transport in lettuce plants. *Physiology Plantarum* 97: 118-122.
- Martínez V., Cerda A. 1989.** Influence of N-source on rate of Cl, N, Na and K uptake by cucumber seedlings grown in saline condition. *Journal of Plant Nutrition* 12: 971-983.
- Martínez-Gaitán C. 2004.** Efecto de las prácticas de manejo de los cultivos hortícolas en invernadero de Almería sobre el riesgo de contaminación de aguas subterráneas con nitratos. Proyecto fin de carrera, Universidad de Almería, 125pp.
- Martínez-Vidal J.L. 1997.** Calidad y contaminación de aguas subterráneas: los sistemas acuíferos del Campo de Dalías y cuenca del Andarax. Instituto de Estudios Almerienses. Actas del I y II seminario del agua, 91-118.
- Masaguer A., Cadahía C., Izaguirre M.A., Sarro M.J. 1990.** Evaluación de la acumulación salina en turba bajo cultivo de tomate y fertirrigación. *Actas de Horticultura* 4: 196-201.
- Masclaux-Daubresse C., Daniel-Vedele F., Dechorgnat J., Chardon F., Gauffichon L., Suzuki A. 2010.** Nitrogen uptake, assimilation and remobilization in plants: challenges for sustainable and productive agriculture. *Annals of Botany* 105: 1141-1157.
- Massa D., Incrocci L., Maggini R., Bibbiani C., Carmassi G., Malorgio F., Pardossi A. 2011.** Simulation of crop water and mineral relations in greenhouse soilless culture. *Environmental Modelling and Software* 26(6): 711-722.
- Maurer M.A., Davies F.S., Graetz D.A. 1995.** Reclaimed wastewater irrigation and fertilization of mature « Redblush » grapefruit trees on spodosols in Florida. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 120(3): 394-402.
- Meiri A., Plaut Z., Pincas L. 1981.** Salt tolerance of glasshouse-grown muskmelon. *Soil Science* 131(3): 189-193.
- Mendlinger S., Pasternak D. 1992a.** Effect of time of salinization on flowering, yield, and fruit quality factors in melon, *Cucumis melo* L. *Journal of Horticultural Science* 67 (4): 529-534.

- Mendlinger S., Pasternak D. 1992b.** Screening for salt tolerance in melons. *HortScience* 27(8): 905-907.
- Mengel K. 2007.** Potassium. In: *Handbook of plant nutrition*. A.Barker and D. Pilbeam (eds). Taylor and Francis Group. New York. pp: 91-120.
- Mengel K., Kirkby E.A. 1987.** Principles of Plant nutrition. 4th ed. International Potash Institute, Bern. 687 pp.
- Mengel K., Kirkby E.A. 2001.** Principles of plant nutrition, 5th ed. Switzerland: International Potash Institute.
- Mengel K., Kirkby E.A., Kosegarten H. , Appel T. 2001.** Principles of plant nutrition. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. 849 pp.
- Meredy R., Wu L., Hallgreen S., Wu Y., Conway K. 2000.** Solid Matrix Priming Improves Seedling Vigor of Okra Seeds. *Proceedings of the Oklahoma Academy of Science* 80: 33-37.
- Merhaut D. 2007.** Magnesium. In: *Handbook of plant nutrition*. A.Barker and D. Pilbeam (eds). Taylor and Francis Group. New York. pp: 146-172.
- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA). 2010.** Plan Nacional de Reutilización de Aguas. Versión Preliminar. 131pp.
- Mittova V., Theodoulou F.L., Kiddle G., Volokita M., Tal M., Foyer C.H., Guy M. 2004.** Comparison of mitochondrial ascorbate peroxidase in the cultivated tomato, *Lycopersicon esculentum*, and its wild, salt-tolerant relative, *L. pennellii*—a role for matrix isoforms in protection against oxidative damage. *Plant, Cell and Environment* 27(2): 237-250.
- Mmolawa K., Or D. 2000.** Root zone solute dynamics under drip irrigation: A review. *Plant and Soil* 222(1-2): 163-190.
- Mohammad M., Shibli R., Ajlouni M., Nimri L. 1998.** Tomato root and shoot response to salt stress under different levels of phosphorous nutrition. *Journal of Plant Nutrition* 21(8): 1667-1680.
- Mohammad M.J., Hammouri A., Ferdows A.E. 2004.** Phosphorus Fertigation and Preplant Conventional Soil Application of Drip Irrigated Summer Squash. *Journal of Agronomy* 3(3): 162-169.
- Mohammad M.J., Mazahreh N. 2003.** Changes in soil fertility parameters in response to irrigation of forage crops with secondary treated wastewater. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 34(9-10): 1281–1294.
- Mohammad- Rusan M.J., Hinnawi S., Rousan L. 2007.** Long term effect of wastewater irrigation of forage crops on soil and plant quality parameters. *Desalination* 215(1): 143-152.
- Mohammad, M.J. Ayadi M. 2004.** Forage yield and nutrient uptake as influenced by secondary treated wastewater. *Journal Plant Nutrition* 27(2): 351–365.
- Mojtahid A., Lamiri M., Choukr-Allah H.A., El Omari H. 2001.** Best management practices for reducing nitrogen pollution under irrigated sweet pepper with treated wastewater. In *ICID International Workshop on Wastewater Reuse Management* 1:19-20.
- Moll R.H., Kamprath E.J., Jackson W.A. 1982.** Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization. *Agronomy Journal* 74: 562-564.

- Mónica P. 2013.** Influencia del riego con agua regenerada en el cultivo hidropónico de tomate bajo diferentes sustratos. Trabajo fin de carrera “Ingeniería Técnica Industrial especialidad en Química”. Universidad Politécnica de Cartagena. 40pp.
- Montserrat X. 1993.** Aplicación de aguas residuales en Sant Jordi (Mallorca). In: Candela L, Varela M (eds) La zona no saturada y la contaminación de las aguas subterráneas. Teoría, Medición y Modelos. Univ Politec Catalunya, Barcelona
- Mor R.P., Manchanda H.R. 1992.** Influence of phosphorus on the tolerance of table pea to chloride and sulfate salinity in a sandy soil. *Arid Land Research and Management* 6(1): 41-52.
- Munns R. 1993.** Physiological processes limiting plant growth in saline soils: some dogmas and hypotheses. *Plant, Cell and Environment* 16(1): 15-24.
- Munns R. 2002.** Comparative physiology of salt and water stress. *Plant, Cell and Environment* 25: 239-250.
- Munns R. 2005.** Genes and salt tolerance: bringing them together. *New Phytologist* 167(3): 645- 663
- Munns R., Husain S., Rivelli A.R., James R.A., Condon A.T., Lindsay M.P., Hare, R.A. 2002.** Avenues for increasing salt tolerance of crops, and the role of physiologically based selection traits. In Progress in Plant Nutrition: Plenary Lectures of the XIV International Plant Nutrition Colloquium (pp. 93-105). Springer Netherlands.
- Munns R., James R.A. 2003.** Screening methods for salt tolerance: a case study with tetraploid wheat. *Plant and Soil* 253: 201-218.
- Munns R., James R.A., Läuchli A. 2006.** Approaches to increasing the salt tolerance of wheat and other cereals. *Journal of Experimental Botany*, 57(5): 1025-1043.
- Munns R., Termaat A. 1986.** Whole plant response to salinity. *Australian Journal of Plant Physiology* 13 (1): 143-160.
- Munns R., Tester M. 2008.** Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review of Plant Physiology* 59: 651-681.
- Muñoz P., Antón A., Paranjpe A., Ariño J., Montero J.I. 2008.** High decrease in nitrate leaching by lower N input without reducing greenhouse tomato yield. *Agronomy for Sustainable Development* 28(4): 489-495.
- Murillo-Amador B., Troyo-Díez E., García-Hernández J.L., López-Aguilar R., Ávila-Serrano N.Y., Zamora-Salgado S., Rueda-Puente E.O., Kaya C. 2006.** Effect of NaCl salinity in the genotypic variation of cowpea (*Vigna unguiculata*) during early vegetative growth. *Scientia Horticulturae* 108: 423-441.
- Nakayama F.S., Bucks D. A. 1991.** Water quality in drip/trickle irrigation: a review. *Irrigation Science* 12(4): 187-192.
- Nawaz H., Zubair M., Derawadan H. 2012.** Interactive effects of nitrogen, phosphorus and zinc on growth and yield of Tomato (*Solanum lycopersicum*). *African Journal of Agricultural Research* 7(26): 3792-3799.
- Neilsen G.H., Parchomchuk P., Neilsen D., Berard R., Hague E.J. 1995.** Leaf Nutrition and Soil Nutrients Are Affected by Irrigation Frequency and Method for NP-Fertigated Gala'Apple. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 120(6): 971-976.

- Neilsen G.H., Stevenson D.S., Fitzpatrick J.J., Brownlee C.H. 1989.** Yield and plant nutrient content of vegetables trickle-irrigated with municipal wastewater. *HortScience* 24: 249-252.
- Nelson D.L., Cox M.M. 2008.** Lehninger Principles of biochemistry. 5th Edition W.H. Freeman Co. New York. USA.
- Niklis N.D., Siomos A.S., Sfakiotakis E.M. 2002.** Ascorbic acid, soluble solids, and dry matter content in sweet pepper fruit: Change during ripening. *Journal of Vegetable Crop Production* 8 (1): 41-51.
- Niu G., Cabrera R. 2010.** Growth and physiological responses of landscape plants to saline water irrigation: A review. *HortScience* 45: 1605-1609.
- Niu G., Rodriguez D.S. 2008.** Responses of growth and ion uptake of four rose rootstocks to chloride or sulfate dominated salinity. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 133: 663-669.
- Niu G., Rodríguez D.S., Aguiniga L., Mackay W. 2007.** Salinity tolerance of *Lupinus havardii* and *Lupinus texensis*. *HortScience* 42: 526-528.
- Noh-Medina J., Borges-Gómez L., Soria-Fregoso M. 2010.** Nutritional composition of biomass and conductive tissue in habanero pepper (*Capsicum chinense* Jacq.). *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 12: 219-228.
- Nukaya A., Masui M., Ishida A. 1980.** Salt tolerance of muskmelons grown in different salinity soils. *園芸学会雑誌*, 48(4): 468-474.
- Oded A., Uzi K. 2003.** Enhanced performance of processing tomatoes by potassium nitrate based nutrition. *Acta Horticulturae* 613: 81-87.
- Olave J., Guzmán, M. 2004.** Effects of N-Form and Saline Priming on Germination and Vegetative Growth of Galia-Type Melon (*Cucumis melo* L. cv. Primal) under Salinity. In VII International Symposium on Protected Cultivation in Mild Winter Climates: Production, Pest Management and Global Competition 659: 253-260.
- Olivieri A.W., Eisenberg D.M., Cooper R.C. 1998.** Health effects study on potable water reuse. In: *Wastewater Reclamation and Reuse* T. Asano (ed.). Technomic Publishing Co., Lancaster PA, USA.
- Olympios C.M., Karapanos I.C., Lionoudakis K., Apidianakis I. 2003.** The growth, yield and quality of greenhouse tomatoes in relation to salinity applied at different stages of plant growth. In: *International Symposium on Managing Greenhouse Crops in Saline Environment* 609 (pp. 313-320).
- Omielon J.A., Epstein E., Davovak J. 1991.** Salt tolerance and ionic relations of wheat affected by individual chromosomes of salt tolerant *Lophopyrum*. *Genome* 34: 961-974.
- O'Neill M.K., Gardner B.R., Roth R.L. 1979.** Orthophosphoric acid as a phosphorus fertilizer in trickle irrigation. *Soil Science Society of America Journal* 43(2): 283-286.
- Oron G., DeMalach Y., Gillerman L., David I., Lurie S. 2002.** Effect of water salinity and irrigation technology on yield and quality of pears. *Biosystems Engineering* 81: 237-247.
- Oster J.D. 1994.** Irrigation with poor quality water. *Agricultural Water Management* 25(3): 271-297.

- Padilla F.M., Peña-Fleitas T., Gallardo M., Thompson R.B. 2014.** Evaluation of optical sensor measurements of canopy reflectance and of leaf flavonols and chlorophyll contents to assess crop nitrogen status of muskmelon. *European Journal of Agronomy* 58: 39-52.
- Palacios M. P., Lupiola P., Del Nero E., Pardo A., Rodríguez F., Pita M.L., Tejedor M.T. 1999.** Primeros resultados del estudio de la persistencia de Salmonella en la zona no saturada del suelo agrícola. Estudios de la Zona No Saturada del Suelo. Eds. R. Muñoz-Carpena, A. Ritter, C. Tascón. ICIA: Tenerife.
- Pall K.K., Roy S.S., Khan, M.S.I. 2011.** Nitrogen and Phosphorus Efficiency on the Fruit Size and Yield of Capsicum. *Journal of Experimental Sciences* 2(1).
- Palomino E. 1980.** Interacción cloruro-nitrato en la nutrición de las plantas de tomate. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma. Madrid.
- Papadopoulos I. 1987.** Nitrogen fertigation of greenhouse-grown tomato. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 18(8): 897-907.
- Papadopoulos I., Rendig V.V., Broadbent F.E. 1985.** Growth, nutrition, and water uptake of tomato plants with divided roots growing in differentially salinized soil. *Agronomy Journal* 77(1): 21-26.
- Papadopoulos I., Rending V.V. 1983.** Interactive effects of salinity and nitrogen on growth and yields of tomato plants. *Plant and Soil* 73:47-57.
- Papadopoulos I., Savvides S. 2003.** Optimisation of the use of nitrogen in the treated wastewater reused for irrigation. *Water Supply* 3(4): 217-221.
- Paranychianakis N.V., Chartzoulakis K.S. 2005.** Irrigation of Mediterranean crops with saline water: from physiology to management practices. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 106: 171-187.
- Pardossi A., Malorgio F., Tognoni F. 1999.** Salt tolerance and mineral relations for celery. *Journal of plant nutrition* 22(1): 151-161.
- Parida A.K., Das A.B. 2005.** Salt tolerance and salinity effects on plants: a review. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 60(3): 324- 349.
- Parra M.A., Cruz-Romero G. 1977.** Salt tolerance of beans under a sand mulch culture. In Managing Saline Water for Irrigation; Proceedings of the International Salinity Conference: 220-235.
- Pedrero F., Alarcón J.J. 2009.** Effects of treated wastewater irrigation on lemon trees. *Desalination* 246: 631-639.
- Pedrero F., Kalavrouziotis I., Alarcón J.J., Koukoulakis P., Asano T. 2010.** Use of treated municipal wastewater in irrigated agriculture- review of some practices in Spain and Greece. *Agricultural Water Management* 97(9): 1233-1241.
- Pegoraro R.F., Oliveira D., Moreira G.G.B.L., Kondo M.K., Maia,V.M., Vieira N.M.B. 2013.** Absorption, Accumulation and Export of Macronutrients by Common Bean Irrigated, and Influenced by Nitrogen Fertilization. *Journal of Agricultural Science* 5(11): 34.
- Pérez V., González de Chaves D., Iglesias E. 1988.** Absorción del nitrógeno contenido en el agua residual depurada y su influencia en el rendimiento. En: *Anales de Edafología y Agrobiología* 47(9-10): 1393-1411.

- Pérez-Alfocea F., Balibrea M.E., Alacon J.J., Bolarín M.C. 2000.** Composition of xylem and phloem exudates in relation to the salt tolerance of domestic and wild tomato species. *Journal of Plant Physiology* 156: 367-374.
- Pérez-Alfocea F., Estañ M.T., Santa Cruz A., Bolarín M.C. 1993.** Effects of salinity on nitrate, total nitrogen, soluble protein and free amino acid levels in tomato plants. *Journal of Horticultural Science* 68(6):1021-1027.
- Pérez-Parra J., Vallverdú A. 1997.** Reutilización de las aguas residuales de Almería en los regadíos del Bajo Andarax. Actas del II Seminario del agua. Instituto de Estudios Almerienses, 265-287.
- Philippar K., Fuchs I., Lüthen H., Hoth S., Bauer C.S., Haga K., Hedrich R. 1999.** Auxin-induced K^+ channel expression represents an essential step in coleoptile growth and gravitropism. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 96(21): 12186-12191.
- Picchioni G.A., Graham C. J. 2001.** Salinity, growth, and ion uptake selectivity of container-grown *Crataegus opaca*. *Scientia Horticulturae* 90: 151-166.
- Pier P.A., Berkowitz G.A. 1987.** Modulation of water stress effects on photosynthesis by altered leaf K^+ . *Plant physiology* 85(3): 655-661.
- Plan Hidrológico de la Cuenca Sur (PHCS). 1999.** Orden de 6 de septiembre de 1999 (BOE 17/09/1999) por la que se dispone la publicación de las determinaciones de contenido normativo del Plan Hidrológico de Cuenca Sur, aprobado por Real Decreto 1664/1998 de 24 de julio
- Polglase P.J., Tompkins D., Stewart L.G., Falkner R.A. 1995.** Mineralization and leaching of nitrogen in an effluent-irrigated pine plantation. *Journal of Environmental Quality* 24: 911-920.
- Pollice A., Lopez A., Laera G., Rubino P., Lonigro A. 2004.** Tertiary filtered municipal wastewater as alternative water source in agriculture: a field investigation in Southern Italy. *Science of the Total Environment* 324: 201-210.
- Pomares F., García A., Gómez H. 2002.** A practical case in the Valencia Community (Spain). In: Sukkel, W. and Garcia Días, A. (Eds.), Final Report on the VEGINECO project. VEGINECO Project Report N° 1, p. 39-53. Applied Plant Research B.V., Wageningen.
- Prats D., Melgarejo J. 2006.** Desalación y reutilización de aguas. Situación en la provincia de Alicante, Fundación COEPA, Alicante.
- Pulido-Bosch A., Martos F.S., Martínez-Vidal J., Navarrete F. 1992.** Groundwater problems in a semiarid area (Low Andarax river, Almeria, Spain). *Environmental Geology and Water Sciences* 20(3): 195-204.
- Pulido-Bosch A. 1998.** Problemática de la sobreexplotación de acuíferos en el Sudeste Español. In *Memoria del Simposio Internacional de Aguas Subterráneas, Mexico* (pp. 48-60).
- Pulido-Bosch A., Navarrete F., Molina L., Martínez-Vidal J.L. 1991.** Quantity and quality of groundwater in the Campo de Dalías (Almería, SE Spain). *Water Science and Technology* 24(11): 87-96.
- Pulido-Bosch A., Díaz M.A., Vallejos A., Andreu J.M. 2012.** Reflexiones Sobre La Gestión De Recursos Hídricos En Regiones Semiáridas. El Sudeste Español. Cuides. *Cuaderno Interdisciplinar de Desarrollo Sostenible* (9): 41-70.

- Pulido-Bosch A., Navarrete F., Martínez-Vidal J. L., Alonso C., Macías A., Molina L., Padilla A. 1988.** Metodología del estudio de intrusión marina del Campo de Dalías (Almería). *TIAC* 88: 295-309.
- Pulido-Bosch A., Navarrete F., Martínez-Vidal J.L., Molina L., Sánchez F., Vallejos A., Martín-Rosales W. 1997.** La contaminación en los acuíferos del Campo de Dalías y Delta del Andarax (Almería). Recursos naturales y medio ambiente en el sureste peninsular, 363-381 pp.
- Pulido-Bosch A., Navarrete F., Molina L., Martínez-Vidal J.L. 1989.** Caracterización hidrogeoquímica del campo de Dalías. *IARA-Dpto. Analítica y Geodinámica de la Universidad de Almería*.
- Pulido-Bosch A., Navarrete F., Vidal J.L. M., Sánchez L.M., Martos F.S., Izquierdo A.V., Martín W. 1997.** La contaminación en los acuíferos del Campo de Dalías y Delta del Andarax (Almería). In *Recursos Naturales y Medio Ambiente en el Sureste Peninsular* (pp. 363-381). Instituto de Estudios Almerienses.
- Qin J.H., Chen X.B., Xiao Z.W., Wang P.T., Sheng C.C., Wang S.W. 2011.** Phosphorus supply ability of soils and optimum phosphorus application rate for vegetables in the greenhouses in Hexi Corridor. *Agricultural Research in the Arid Areas* 3: 31.
- Raghothama K.G., Karthikeyan A.S. 2005.** Phosphate acquisition. *Plant and Soil* 274: 37-49.
- Rai P.K., Tripathi B.D. 2007.** Microbial contamination in vegetables due to irrigation with partially treated municipal wastewater in a tropical city. *International Journal of Environmental Health Research* 17(5): 389-395.
- Ramakrishna K., Krishnappa K.S., Umamaheswarappa P. 2002.** Dry-matter production, nutrient accumulation, and uptake of primary nutrients in French bean (*Phaseolus vulgaris* L.) as affected by genotypes, spacings, and fertilizer levels. *South Indian Horticulture* 50:105-112.
- Ramírez-Fuentes E., Lucho-Constantino C., Escamilla-Silva E., Dendooven L. 2002.** Characteristics, and carbon and nitrogen dynamics in soil irrigated with wastewater for different lengths of time. *Bioresource Technology* 85: 179-187.
- Ramos C. 1997.** El uso de aguas residuales en riegos localizado y en cultivos hidropónicos. Forum Internacional de Horticultura y Tecnología (Fitech), III FITECH “La automatización de la Hidroponía y Fertirrigación”, Valencia (España).
- Ramos C., Gómez de Barreda D., Oliver J., Lorenzo E., Castell J.R. 1989.** Aguas residuales para riego: Un ejemplo de aplicación en uva de mesa. En: *El agua en la Comunidad Valenciana*. E. Cabrera y A. Sahuquillo (eds). Generalitat Valenciana, Spain
- Rauschkolb R.S., Rolston D.E., Miller R.J., Carlton A.B., Burau R.G. 1976.** Phosphorus fertilization with drip irrigation. *Soil Science Society of America Journal* 40(1): 68-72.
- Ravikovitch S., Porath A. 1967.** The effect of nutrients on the salt tolerance of crops. *Plant and Soil* 26(1): 49-71.
- Ravina I., Paz E., Sofer Z., Marcu A., Schischa A., Sagi G. 1992.** Control of emitter clogging in drip irrigation with reclaimed wastewater. *Irrigation Science* 13: 129-139.
- Ravina I., Paz E., Sofer Z., Marcu A., Schischa A., Sagi G., Yechialy Z., Lev Y. 1997.** Control of clogging in drip irrigation with stored treated municipal sewage effluent. *Agricultural Water Management* 33: 127-137.

- Reboll V., Cerezo M., Roig A., Flors V., Lapeña L., García-Agustín P. 2000.** Influence of wastewater vs. groundwater on young Citrus trees. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 80: 1441-1446.
- Reca J., Martinez J., Zapata A., Lopez J.G., Callejon J. L. 1999.** El problema del agua en el futuro de la horticultura en Almería. *Vida Rural* 15: 40-42.
- Rengel Z. 1992.** The role of calcium in salt toxicity. *Plant, Cell Environment* 15: 625-632.
- Rhoades J.D. 1971.** Quality of water for irrigation. *Soil Science* 113(4): 277-284.
- Rhoades J.D., Kandiah A., Mashali A.M. 1992.** The use of saline waters for crop production [FAO Irrigation and Drainage Paper 48]. FAO, Rome, 133.
- Rico A.M., Paños V., Olcina J., Baños C. 1998.** Depuración, desalación y reutilización de aguas en España. Editado por Oikos-Tau, S.L., Barcelona.
- Rincón L., Sáez J., Pérez J., Pellicer C., Gómez M. 1998.** Crecimiento y absorción de nutrientes del melón bajo invernadero. *Investigación Agraria. Producción y Protección Vegetales* 13: 111-120.
- Rincón S.L. 2002.** Bases de la fertilización para solanáceas y cucurbitáceas cultivadas en invernadero bajo planteamiento de producción integrada. 12 Symposium Internacional. Ecología y producción integrada en cultivos hortícolas en invernadero. *Pytoma* 135: 34-46.
- Robinson A.B., Robinson N.E., Soon W. 2007.** Environmental effects of increased atmospheric carbon dioxide. *Journal of the Association of American Physicians and Surgeons* 12: 79-90.
- Roldán J. 1997.** La reutilización en la agricultura y en los campos de golf. Curso “Reutilización de aguas para riego”. 24-25/11/97. Valencia.
- Romero-Aranda R., Soria T., Cuartero J. 2001.** Tomato plant- water uptake and plant- water relationships under saline growth conditions. *Plant Science* 160: 265-272.
- Roorda van Eysinga, J.P.N.L. 1966a.** Bemesting van tomaten met kali. Verslagen van landbouwkundige onderzoekingen, PUDOC, Wageningen, 677: 37.
- Roorda van Eysinga, J.P.N.L., 1966b.** Mineral fertilization, yield and quality of vegetables. In, Proceedings 8th International Potash Congress, Brussels, International Potash Institute, Bern, Switzerland, pp: 217-233.
- Rosas I., Baez A., Coutino M. 1984.** Bacteriological quality of crops irrigated with wastewater in the Xochimilco plots, Mexico City, Mexico. *Applied and Environmental Microbiology* 47(5): 1074-1079.
- Royo A., Araquies R., Quílez D. 1991.** Descripción y evaluación de cuatro modelos de respuesta de cultivares de cebada a la salinidad. *Investigación Agraria: Producción y Protección Vegetales* 6(3): 319-330.
- Ruan Y.L., Llewellyn D.J., Furbank R.T. 2001.** The control of single-celled cotton fiber elongation by developmentally reversible gating of plasmodesmata and coordinated expression of sucrose and K⁺ transporters and expansin. *The Plant Cell* 13(1): 47-60.
- Rubio J.S., García-Sánchez F., Flores P., Navarro J.M., Martínez V. 2010.** Yield and fruit quality of sweet pepper in response to fertilisation with Ca²⁺ and K⁺. *Spanish Journal of Agricultural Research* 8(1): 170-177.

- Ruiz J.M., Romero L. 1998.** Tomato genotype in relation to nitrogen utilization and yield. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 46(10): 4420-4422.
- Salas M. C., Urestarazu M. 2004.** Métodos de riego y fertirrigación en cultivos sin suelo. En: *Tratado de Cultivo sin suelo*. M. Urrestarazu (ed). Ediciones Mundi-Prensa, Madrid. pp: 161-201.
- Salim M. 1989.** Effects of NaCl and KCl salinity on growth and ionic relations of red kidney beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Journal of Agronomy and Crop Science* 163: 338-344.
- Salinas J.A. 2001.** Los recursos hídricos de Almería. En: Problemática de la gestión del agua en regiones semiáridas. Instituto de Estudios Almerienses y Diputación de Almería (Eds.) Colección Actas 42: 161-166.
- Sánchez A. 2004.** Análisis y diagnóstico nutricional en los cultivos sin suelo. En *Tratado de Cultivo sin suelo. 3ª edición*. M. Urrestarazu (ed). Ediciones Mundi- Prensa, Madrid. 49-78 pp.
- Sánchez-Martos F. 1997.** Estudio hidrogeoquímico del Bajo Andarax (Almería). Tesis Doctoral Universidad de Granada. 290 pp.
- Sánchez-Martos F., Espinosa R.J., Pulido Bosch A.P. 2001.** Caracterización hidrogeoquímica del acuífero detrítico del Bajo Andarax (Almería) por medio de técnicas estadísticas y geoestadísticas. En: *V Simposio sobre el Agua en Andalucía* (pp. 225-236). Universidad de Almería.
- Savvas D. 2002.** Automated Replenishment of Recycled Greenhouse Effluents with Individual Nutrients in Hydroponics by Means of Two Alternative Models. *Biosystems Engineering* 83(2): 225-236.
- Savvas D., Stamati E., Tsirogiannis I.L., Mantzos N., Barouchas P.E., Katsoulas N., Kittas C. 2007.** Interactions between salinity and irrigation frequency in greenhouse pepper grown in closed-cycle hydroponic systems. *Agricultural Water Management* 91(1): 102-111.
- Scaife M.A., Bar-Yosef B. 1995.** Nutrient and Fertilizer Management in Field Grown Vegetables. IPIBulletin 13. *International Potash Institute*, Basel, Switzerland.
- Schipper L.A., Williamson J.C., Kettles H.A., Speir T.W. 1996.** Impact of land-applied tertiary-treated effluent on soil biochemical properties. *Journal of Environmental Quality* 25: 1073-1077.
- Schon M.K., Compton M.P., Bell E., Burns I. 1994.** Nitrogen concentrations affect pepper yield and leachate nitrate-nitrogen from rockwool culture. *HortScience* 29:1139-1142.
- Schwarz M. 1979.** Irrigation with brackish water in soilless culture. *Acta Horticulturae* 89: 151-154.
- Segura M.L. 1995.** Fertirrigación de cultivos hortícolas en condiciones salinas con sistema enarenado y sustratos alternativos. Tesis Doctoral, Universidad Autónoma de Madrid.
- Segura M.L., Contreras J.I. 2014.** Efecto de la dosis NPK y salinidad del agua sobre los rendimientos y absorción de nutrientes del cultivo de tomate bajo invernadero. *Actas de Horticultura* 66: 72-77.
- Segura M.L., Contreras J.I., Eymar E. 2013.** Manejo de la fertirrigación e influencia en el sistema suelo-agua-planta. En: *Gestión Sostenible de la Reutilización de Aguas Residuales Urbanas en los Cultivos Hortícolas*. M.L. Segura, J.I. Contreras y Fernández

- M.M. (eds.). Pag.43-64. IFAPA. Consejería de Agricultura y Medio Ambiente (Junta de Andalucía). DL: AL 1135-2012.
- Segura M.L., Contreras J.I., Galindo P. 2007.** Response of greenhouse tomato crop to NPK fertilization and quality of irrigation water. *Acta Horticulturae* 747: 485-488.
- Segura M.L., Contreras J.I., Plaza B.M., Lao M.T. 2012.** Assessment of the Nitrogen and Potassium Fertilizer in Green Bean Irrigated with Disinfected Urban Wastewater. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 43: 426-433.
- Segura M.L., Contreras J.I., Salinas R., Lao M.T. 2009a.** Influence of Salinity and Fertilization Level on Greenhouse Tomato Yield and Quality. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 40: 485-497.
- Segura M.L., Contreras J.I., Salinas R., Lao M.T. 2009b.** Influence of salinity and fertilization level on the nutrient distribution in tomato plants under a polyethylene greenhouse in the Mediterranean area. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 40: 498-513.
- Segura M.L., Granados M.R., Moreno J., Urrestarazu M. 2004.** Response of greenhouse melón and tomato crops to wastewater fertirrigation. *Acta Horticulturae* 633: 391-396.
- Segura M.L., Granados R., Contreras J.I., Martín E., Rodríguez J.M. 2006.** Greenhouse managements of the potassium fertilization of a green bean crop. *Acta Horticulturae* 700: 145-148.
- Segura M.L., Moreno R., Martínez S., Pérez J., Moreno J. 2001.** Effects of wastewater irrigation on melon growth under greenhouse conditions. *Acta Horticulturae* 559: 345-352.
- Serrano R. 1996.** Salt tolerance in plants and microorganisms: toxicity targets and defense responses. *International Review of Cytology* 165: 1-52.
- Shahalam A., Abu Zahra B.M., Jaradat A. 1998.** Wastewater irrigation effect on soil, crop and environment: A pilot scale at Irbid, Jordan. *Science and Technology* 106: 425-455.
- Shani U., Dudley L.M. 2001.** Field studies of crop response to water and salt stress. *Soil Science Society of America Journal* 65(5): 1522-1528.
- Shannon M.C. 1997.** Adaptation of plants to salinity. *Advances in Agronomy* 60 (1):75-120.
- Shannon M.C., Francois L.E. 1978.** Salt tolerance of three muskmelon cultivars. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 103:127-130.
- Shannon M.C., Grieve C.M. 1999.** Tolerance of vegetable crops to salinity. *Scientia Horticulturae* 78: 5-38.
- Shannon M.C., Grieve C.M., Francois L.E. 1994.** Whole-plant response to salinity. In: *Plant Environment Interactions*. R.E. Wilkinson (ed.). Marcel Dekker, New York. pp. 199-244.
- Sharon M.L., Leonel D.S., Lobo S. 2005.** Growth and gas exchange responses of Brazilian pepper and native South Florida species to salinity. *Trees- Structure and Function* 19 (2): 119-128.
- Sharpley A.N., Smith S.J., Jones O.R., Berg W.A., Coleman G.A. 1992.** The transport of bioavailable phosphorus in agricultural runoff. *Journal of Environmental Quality* 21 (1): 30-35.

- Shetty A.A., Rana R., Buckseth T., Preetham S.P. 2012.** Waste Utilization in Cucurbits: A Review. *Waste and Biomass Valorization* 3(3): 363-368.
- Silberbush M., Ben-Asher J. 2001.** Simulation study of nutrient uptake by plants from soilless cultures as affected by salinity buildup and transpiration. *Plant and Soil* 233(1): 59-69.
- Sivritepe H.O., Sivritepe A., Eris A., Abak K., Buyukalaca S. 1999.** The effect of NaCl priming on salt tolerance in melon seedlings. *Acta Horticulturae* 492:77-74.
- Sivritepe N., Sivritepe H.O., Eris A. 2003.** The effects of NaCl priming on salt tolerance in melon seedlings grown under saline conditions. *Scientia Horticulturae* 97(3-4): 229-237.
- Smith S.N. 1934.** Response of inbred lines and crosses in maize to variations of nitrogen and phosphorus supplied as nutrients. *Agronomy Journal* 26 (9): 785-804.
- Song Y.Y., Zeng R.S., Xu J.F., Li J., Shen X., Yihdego W.G. 2010.** Interplant communication of tomato plants through underground common mycorrhizal networks. *PLoS One* 5(10), e13324.
- Sonneveld C. 1980.** Growing cucumbers and tomatoes in rockwool. In: International Society for Soilless Culture: Proceedings, Fifth International Congress on Soilless Culture. (pp. 253-262). Secretariat, ISOSC.
- Sonneveld C. 2000.** Effects of salinity on substrate grown vegetables and ornamentals in greenhouse horticulture. Wageningen Universiteit.
- Sonneveld C. 2004.** La nutrición mineral y salinidad en los cultivos sin suelo: su manejo. En Urrestarazu, M. (ed). Tratado de Cultivo sin suelo. 3ra edición. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid. pp: 305-366.
- Sonneveld C., van den Burg A.M.M. 1991.** Sodium chloride salinity in fruit vegetable crops in soilless culture. *Netherlands Journal of Agricultural Science* 39: 115-122.
- Sonneveld C., Voogt S.J. 1981.** Nitrogen, potash and magnesium nutrition of some vegetable fruit crops under glass. *Netherlands Journal of Agricultural Science* 29: 129-139.
- Sonneveld C., Voogt W. 2009.** Salinity and water quality. In: *Plant nutrition greenhouse crops*. C. Sonneveld and W. Voogt (eds). Springer, Dordrecht, pp. 127-155.
- Speir T.W., Van Schaik A.P., Kettles H.A., Vicent K.W., Campbell D.J. 1999.** Soil and stream-water impacts of sewage effluent irrigation onto steeply sloping land. *Journal of Environmental Quality* 28: 1105-1114.
- Stanghellini C., Kempkes F., Heuvelink E., Bonasia A., Karas A., Botden N. 2003.** Water and nutrient uptake of sweet pepper and tomato as (un)affected by watering regime and salinity. *Acta Horticulturae* 614:591-597.
- Steele M., Odumeru J. 2004.** Irrigation water as source of foodborne pathogens on fruit and vegetables. *Journal of Food Protection* 67(12): 2839-2849.
- Stefanelli D., Goodwin I., Jones R. 2010.** Minimal nitrogen and water use in horticulture: Effects on quality and content of selected nutrients. *Food Research International* 43(7): 1833-1843.
- Steiner A.A. 1968.** Soilless culture. In: *The fertilization of protected crops*. International Potash Institute (eds). Proc 6th Collo Internat Potash Inst, Berne, Switzerland, pp 324-341

- Subbarao G., Johansen C., Jana M., Kumar J. 1990.** Effects of the sodium/calcium ratio in modifying salinity response of pigeonpea (*Cajanus cajan*). *Journal of Plant Physiology* 136: 439-443.
- Taiz L., Zeiger E. 2006.** Fisiología Vegetal. 3ª Edición. Publicaciones de la Universitat Jaume I. D. L. pp. 1265.
- Tang X., Wu M., Yang W., Yin W., Jin F., Ye M., Currie N., Scholz M. 2012.** Ecological strategy for eutrophication control. *Water, Air, Soil Pollution* 223(2): 723-737.
- Tanji K., Grattan S., Grieve C., Harivandi A., Rollins L., Shaw D., Sheikh B., Wu L. 2008.** A comprehensive literature review on salt management guide for landscape irrigation with recycled water in coastal southern California. http://www.salinitymanagement.org/Literature_Review.pdf.
- Tester M., Davenport R. 2003.** Na⁺ tolerance and Na⁺ transport in higher plants. *Annals of Botany* 91: 503- 527.
- Thakur B.R., Singh R.K., Nelson P.E. 1996.** Quality attributes of processed tomato products: A review. *Food Reviews International* 12: 375-401.
- Thompson R., Gallardo M., Giménez C. 2002.** Assessing risk of nitrate leaching from the horticultural industry of Almería, Spain. *Acta horticultrae* 571: 243-254.
- Thompson R., Gallardo M., Giménez C., Padilla F. 2013.** Sensitivity optical sensors to crop N status of a melon crop. In: *International Workshop on Nitrogen, Environment and Vegetables*. Torino, Italia.
- Thompson R.B., Gallardo M., Joya M., Segovia C., Martínez-Gaitán C., Granados M.R. 2009.** Evaluation of rapid analysis systems for on-farm nitrate analysis in vegetable cropping. *Spanish Journal of Agricultural Research* 7(1): 200-211.
- Thompson R.B., Martínez-Gaitán C., Gallardo M., Giménez C., Fernández M.D. 2007.** Identification of irrigation and N management practices that contribute to nitrate leaching loss from an intensive vegetable production system by use of a comprehensive survey. *Agricultural Water Management* 89(3): 261-274.
- Tiwari K.K., Singh N.K., Patel M.P., Tiwari M.R., Rai U.N. 2011.** Metal contamination of soil and translocation in vegetables growing under industrial wastewater irrigated agricultural field of Vadodara, Gujarat, India. *Ecotoxicology and environmental safety* 74(6): 1670-1677.
- Torres B.C., Bingham F.T. 1973.** Salt tolerance of Mexican wheat. I. Effect of NO₃ and NaCl on mineral nutrition, growth, and grain production of four wheats. *Proceedings - Soil Science Society of America* 37: 711-715.
- Tscheschke P., Alfaro J.F., Keller J., Hanks R.J. 1974.** Trickle irrigation soil water potential as influenced by management of highly saline water. *Soil Science* 117(4): 226-231.
- Tzanakis V.E., Paranychianakis N.V., Kyritsis S., Angelakis A.N. 2003.** Wastewater treatment and biomass production by slow rate systems using different plants species. *Water Science and Technology* 3(4):185–192
- Unión Europea. Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000,** por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas. Diario Oficial de las Comunidades Europeas L 327/1, 22 de diciembre de 2010, pp. 1-73.

- Unión Europea. Directiva 91/271/CEE Directiva del Consejo, de 21 de mayo de 1991,** sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas. Diario Oficial de las Comunidades Europeas L 135/40, 30 de mayo de 1991, pp. 1-40.
- Unno H., Maeda Y., Yamamoto S., Okamoto M., Takenaga H. 2002.** Relationship between salt tolerance and Ca^{2+} retention among plant species. *Soil Science and Plant Nutrition* 73: 715- 718.
- Urbano P. 1992.** Tratado de Fitotecnia General. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. Pp 895.
- Urrestarazu M. 2004.** Tratado de cultivos sin suelo, 3rd ed. Madrid, Spain: Ed. Mundi-Prensa.
- Vadell J., Rebassa M.J., Soler J.M., Farrús E., Cañellas I. 1998.** Densidad y tiempo de supervivencia de coliformes totales y fecales en suelos regados con aguas residuales regeneradas. Actas del XVI Congreso Nacional de Riegos, p. 581-588. Palma 2-4 junio de 1998.
- Valdez M.T., Ito T., Shinohara Y., Maruo T. 2002.** Effects of nutrient solution levels on the growth, yield, and mineral contents in hydroponically grown bush snap bean. *Environment Control in Biology* 40:167–175.
- Valdez-Aguilar L., Grieve C., Poss J. 2009.** Salinity and alkaline pH in irrigation water affect marigold plants: II. Mineral ion relations. *HortScience* 44 (6): 1726-1735.
- Van Eerd L.L., O'Reilly K.A. 2009.** Yield, nitrogen dynamics, and fertilizer use efficiency in machine-harvested cucumber. *HortScience* 44(6): 1712-1718.
- Van Genuchten M. T. 1983.** Analyzing crop salt tolerance data: Model description and user's manual. US Department of Agriculture, Agricultural Research Service, US Salinity Laboratory.
- Walid-Qawasmi M., Husam-Najim M.J., Remon-Qubursi. 1999.** Response of bell pepper grown inside plastic houses to nitrogen fertigation. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 30 (17-18): 2499–2509.
- Wang Y., Li L., Cui W., Xu S., Shen W., Wang R. 2012.** Hydrogen sulfide enhances alfalfa (*Medicago sativa*) tolerance against salinity during seed germination by nitric oxide pathway. *Plant and Soil* 351(1-2): 107-119.
- Warner J., Zhang T.Q., Hao X. 2004.** Effects of nitrogen fertilization on fruit yield and quality of processing tomatoes. *Canadian Journal of Plant Science* 84(3): 865-871.
- White R.A.J. 1992.** Commercial use of soilless culture for tomatoes in New Zealand. ISOSC Proceedings of Eight International Congress on Soilless Culture Hunters rest. 483-496.
- Wu L., Dodge. L. 2005.** Landscape Salt Tolerance Selection Guide for Recycled Water Irrigation. A Special Report for the Elvenia J. Slosson Endowment Fund. http://slosson.ucdavis.edu/Landscape_Plant_Selection_Guide_for_Recycled_Water_Irrigation/.
- Wuzhong N. 2002.** Yield and quality of fruits of solanaceous crops as affected by potassium fertilization. *Better Crops International* 16(1): 6-8.
- Xu Z.X., Takeuchi K., Ishidaira H., Zhang X.W. 2002.** Sustainability analysis for Yellow River water resources using the system dynamics approach. *Water Resources Management* 16(3): 239-261.
- Yagmur B., Okur B., Ongun A.R. 2004.** Effects on Enhanced Potassium Doses on Yield, Quality and Nutrient Uptake of Tomato. IPI regional workshop on Potassium and

- Fertigation development in West Asia and North Africa; Rabat, Morocco, 24-28 November, 2004.
- Yaling L. 2000.** *Analysis of greenhouse tomato production in relation to salinity and shoot environment*. Landbouwniversiteit Wageningen (Wageningen Agricultural University).
- Yan Z., Liu P., Li Y., M, L., Alva A., Dou Z., Zhang F. 2013.** Phosphorus in China's intensive vegetable production systems: Overfertilization, soil enrichment, and environmental implications. *Journal of Environmental Quality* 42(4): 982-989.
- Yasuor H., Ben-Gal A., Yermiyahu U., Beit-Yannai E., Cohen S. 2013.** Nitrogen Management of Greenhouse Pepper Production: Agronomic, Nutritional, and Environmental Implications *HortScience* 48: 1241-1249
- Zamora F., Rodríguez N., Rodríguez D.T., Yendis H. 2008.** Efecto del riego con aguas residuales sobre propiedades químicas de suelos de la planicie de Coro, Estado Falcón. *Bioagro* 20(3): 193-199.
- Zekri M., Koo R.C.J. 1993.** A reclaimed water citrus irrigation project. *Proceedings of the Florida State Horticultural Society* 106: 30-35.
- Zekri M., Koo R.C.J. 1994.** Treated municipal wastewater for citrus irrigation. *Journal of Plant Nutrition* 17:693-708.
- Zhang A., Huang Dan F., Hou Z. 2002.** Effect of potassium nutrient on development and photosynthesis of melon plant. *Journal of Shanghai Agricultural College* 20(1): 13-17.
- Zhang T.Q., Liu K., Tan C.S., Hong J.P., Warner J. 2010b.** Evaluation of agronomic and economic effects of nitrogen and phosphorus additions to green pepper with drip fertigation. *Agronomy Journal* 102(5): 1434-1440.
- Zhang T.Q., Liu K., Tan C.S., Warner J., Wang Y.T. 2011.** Processing tomato nitrogen utilization and soil residual nitrogen as influenced by nitrogen and phosphorus additions with drip-fertigation. *Soil Science Society of America Journal* 75(2): 738-745.
- Zhang T.Q., Tan C.S., Liu K., Drury C.F., Papadopoulos A.P., Warner J. 2010a.** Yield and economic assessments of fertilizer nitrogen and phosphorus for processing tomato with drip fertigation. *Agronomy Journal* 102(2): 774-780.
- Zhu J.H., Li X.L., Christie P., Li J.L. 2005.** Environmental implications of low nitrogen use efficiency in excessively fertilized hot pepper (*Capsicum frutescens* L.) cropping systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 111(1): 70-80.
- Zhu J.K. 2001.** Plant salt tolerance. *Trends Plant Science* 6: 66-71.
- Zhu J.K. 2003.** Regulation of ion homeostasis under salt stress. *Current Opinion in Plant Biology* 6: 441- 445.
- Zhu J.K., Shi J., Singh U., Wyatt S.E., Bressan R.A., Hasegawa P.M. , Capita N.C. 1993.** Enrichment of vitronectin and fibronectin like proteins in NaCl-adapted plant cells and evidence for their involvement in plasma membrane-cell wall adhesion. *Plant Journal* 3: 637- 646.
- Zrenner R., Stitt M., Schmidt R., Sonnewald U., Boldt R. 2006.** Pyrimidine and purine biosynthesis and degradation in plants. *Annual Review of Plant Biology* 57: 805-836.

ANEXO 1

Concentración de Nutrientes en la Planta

Tabla A1.1. Concentración de macronutrientes (%) y materia seca (g m^{-2}) de la parte aérea del cultivo de melón (hoja, tallo, fruto y total) obtenidos en la primera experiencia. MS: Agua de salinidad media; HS: Agua de salinidad elevada.

		N	P	K	Ca	Mg	MS
	Tratamiento	% s.m.s.					g m^{-2}
Hoja	MS-F ₁	1,10c	0,44b	1,65b	7,40a	1,72cd	116,1c
	MS-F ₂	1,26b	0,49a	2,22a	7,37a	1,65d	163,7b
	MS-F ₃	1,55a	0,48a	2,55a	8,14a	1,61d	234,5a
	HS-F ₁	1,08c	0,47a	1,60b	8,39a	2,10ab	112,4c
	HS-F ₂	1,13c	0,24d	1,46b	7,44a	2,28a	154,3b
	HS-F ₃	1,15c	0,29c	1,78b	7,04a	2,06abc	221,4a
	Salinidad	*	*	*	ns	*	ns
	Dosis NK	*	*	*	ns	ns	*
	Interacción	*	*	ns	ns	ns	ns
Tallo	MS-F ₁	0,77b	0,42ab	4,13ab	1,54ab	0,96a	50,6d
	MS-F ₂	0,80b	0,46a	4,31ab	1,32abc	0,91a	96,0c
	MS-F ₃	0,98a	0,37cb	4,63a	1,60a	0,77a	141,0a
	HS-F ₁	0,78b	0,27d	3,26c	1,15c	0,84a	52,2d
	HS-F ₂	0,77b	0,25d	3,46c	1,32acb	0,80a	77,6c
	HS-F ₃	0,81b	0,30cd	4,07b	1,30bc	0,77a	115,5b
	Salinidad	*	*	*	*	*	*
	Dosis NK	*	ns	*	ns	*	*
	Interacción	*	ns	ns	*	ns	ns
Fruto	MS-F ₁	1,55c	0,33a	2,69d	0,54a	0,39ab	170,6d
	MS-F ₂	1,60c	0,28a	3,14b	0,46ab	0,40ab	299,0b
	MS-F ₃	1,93a	0,15b	3,39a	0,53a	0,35bc	359,4a
	HS-F ₁	1,28e	0,31a	2,78c	0,32cd	0,40ab	230,6c
	HS-F ₂	1,70b	0,30a	2,40e	0,37bc	0,45a	331,7ab
	HS-F ₃	1,46d	0,29a	2,02f	0,18d	0,30c	346,0ab
	Salinidad	*	ns	*	*	ns	ns
	Dosis NK	*	*	*	ns	*	*
	Interacción	*	*	*	ns	*	ns
Total parte aérea ¹	MS-F ₁	1,03bc	0,30a	2,08c	1,93a	0,64a	360,8c
	MS-F ₂	1,13b	0,30a	2,60b	1,69a	0,61a	579,9b
	MS-F ₃	1,33a	0,23b	2,83a	2,10a	0,57a	759,1a
	HS-F ₁	0,88d	0,26ab	1,94cd	1,60a	0,51a	417,5c
	HS-F ₂	1,10bc	0,18c	1,72e	1,50a	0,62a	601,5b
	HS-F ₃	1,00c	0,22bc	1,81de	1,61a	0,57a	717,0a
	Salinidad	*	*	*	ns	ns	ns
	Dosis NK	*	*	*	ns	ns	*
	Interacción	*	*	*	ns	ns	ns

¹ Incluye hoja, tallo, fruto, fruto en formación y poda

* Significativo $p \leq 0,05$; ns. No significativo. Letras distintas en una misma columna indican diferencias significativas entre tratamientos utilizando el test de comparación de medias LSD (mínima diferencia significativa) a $p \leq 0,05$.

Anexo 1. Concentración de Nutrientes en la Planta

Tabla A1.2. Concentración de macronutrientes (%) y materia seca (g m^{-2}) de la parte aérea del cultivo de melón (hoja, tallo, frutos y total) obtenidos en la segunda experiencia. MS: Agua de salinidad media; HS: Agua de salinidad elevada.

Tratamiento		N	P	K	Ca	Mg	MS
		% s.m.s.					g m^{-2}
Hoja	MS-F ₂	1,31 e	0,31 b	1,43 c	6,61 d	1,41 e	134,1 d
	MS-F ₄	1,36 d	0,30 b	1,65 b	7,24 b	1,61 d	203,2 b
	MS-F ₅	1,54 c	0,26 c	2,00 a	8,31 a	1,73 c	265,4 a
	HS-F ₂	1,50 c	0,28 bc	1,26 d	5,64 e	2,22 a	158,5 cd
	HS-F ₄	2,05 b	0,28 bc	1,49 c	5,31 f	1,75 c	196,3 bc
	HS-F ₅	2,71 a	0,35 a	1,94 a	6,78 c	1,95 b	265,0 a
	Salinidad	*	ns	*	*	*	ns
	Dosis NK	*	ns	*	*	*	*
	Interacción	*	*	ns	*	*	ns
Tallo	MS-F ₂	1,08 d	0,25 c	2,26 e	1,31 cd	0,95 a	59,3 c
	MS-F ₄	1,15 c	0,21 d	3,28 c	1,45 a	0,75 c	91,8 b
	MS-F ₅	1,22 b	0,18 d	3,65 a	1,33 bc	0,73 c	133,3 a
	HS-F ₂	1,21 bc	0,26 c	2,28 e	1,46 a	0,85 b	65,6 c
	HS-F ₄	1,43 a	0,30 b	3,03 d	1,28 d	0,81 b	98,8 b
	HS-F ₅	1,47 a	0,36 a	3,33 b	1,37 b	0,73 c	142,2 a
	Salinidad	*	*	*	ns	ns	ns
	Dosis NK	*	ns	*	ns	*	*
	Interacción	*	*	*	*	*	ns
Fruto	MS-F ₂	1,05 f	0,35 e	2,47 d	0,44 c	0,28 d	588,1 c
	MS-F ₄	1,34 d	0,42 b	2,58 c	0,56 a	0,29 d	718,2 b
	MS-F ₅	1,52 c	0,39 c	2,93 b	0,52 b	0,31 c	832,8 a
	HS-F ₂	1,26 e	0,37 d	2,58 c	0,46 c	0,34 b	641,0 c
	HS-F ₄	1,65 b	0,41 b	2,93 b	0,48 c	0,34 b	802,5 b
	HS-F ₅	1,73 a	0,49 a	3,26 a	0,54 b	0,39 a	881,8 a
	Salinidad	*	*	*	*	*	ns
	Dosis NK	*	*	*	*	*	*
	Interacción	*	*	*	*	ns	ns
Total parte aérea ¹	MS-F ₂	1,41 e	0,40 c	2,78 e	1,92 c	0,63 d	725,6 c
	MS-F ₄	1,76 d	0,45 b	3,08 d	2,52 b	0,74 c	921,5 b
	MS-F ₅	2,00 c	0,41 c	3,59 b	2,80 a	0,82 b	1107,5 a
	HS-F ₂	1,69 d	0,41 c	2,83 e	1,87 c	0,92 a	754,5 c
	HS-F ₄	2,18 b	0,45 b	3,30 c	1,87 c	0,83 b	901,6 b
	HS-F ₅	2,50 a	0,55 a	3,79 a	2,40 b	0,95 a	1121,0 a
	Salinidad	*	*	*	*	*	ns
	Dosis NK	*	*	*	*	*	*
	Interacción	*	*	*	*	*	ns

¹ Incluye hoja, tallo, fruto, fruto en formación y poda

* Significativo $p \leq 0,05$; ns. No significativo. Letras distintas en una misma columna indican diferencias significativas entre tratamientos utilizando el test de comparación de medias LSD (mínima diferencia significativa) a $p \leq 0,05$.

Tabla A1.3. Concentración de macronutrientes (%) y materia seca (g m^{-2}) de los órganos aéreos y total de la parte aérea (hoja, tallo, fruto y total) obtenidos en el cultivo de tomate. WQm: Agua de salinidad media; WQh: Agua de salinidad elevada.

	Tratamiento	N	P	K	Ca	Mg	MS
				% s.m.s.			g m ⁻²
Hoja	WQmF ₁	1,75 b	0,18 e	0,66 e	2,82 d	0,59 e	296,2 c
	WQmF ₂	1,49 c	0,27 c	1,48 b	4,58 a	0,89 d	323,2 c
	WQmF ₃	1,96 a	0,30 b	1,46 b	4,57 a	1,15 c	624,7 a
	WQhF ₁	1,37 d	0,14 f	0,95 d	4,10 c	2,00 a	361,9 bc
	WQhF ₂	1,80 b	0,25 d	0,87 d	4,42 b	2,01 a	500,5 ab
	WQhF ₂	2,02 a	0,45 a	1,63 d	4,09 c	1,83 b	524,0 a
	Salinidad	ns	*	*	*	*	ns
	Dosis NPK	*	*	*	*	*	*
	Interacción	*	*	*	*	*	*
Tallo	WQmF ₁	0,97 d	0,60 a	3,17 a	0,46 e	0,60 e	155,3 d
	WQmF ₂	1,27 a	0,50 c	2,69 c	1,01 a	0,99 a	185,8 cd
	WQmF ₃	1,08 c	0,55 b	2,88 b	0,59 b	0,64 d	312,4 a
	WQhF ₁	1,05 c	0,39 e	2,34 d	0,55 c	0,86 b	235,5 bc
	WQhF ₂	1,10 bc	0,45 d	2,27 de	0,61 b	0,74 c	238,5 bc
	WQhF ₂	1,17 b	0,37 f	2,17 e	0,50 d	0,73 c	290,2 ab
	Salinidad	ns	*	*	*	*	*
	Dosis NPK	*	*	*	*	*	*
	Interacción	*	*	*	*	*	*
Fruto	WQmF ₁	1,38 d	0,30 b	2,69 e	0,27 d	0,12 c	643,3 c
	WQmF ₂	1,51 c	0,32 a	2,82 d	0,37 b	0,14 b	905,7 b
	WQmF ₃	1,73 b	0,27 c	2,85 d	0,37 d	0,11 d	966,9 b
	WQhF ₁	1,55 c	0,24 e	3,05 a	0,36 c	0,15 a	715,5 c
	WQhF ₂	1,71 b	0,25 de	3,01 b	0,41 a	0,15 a	936,4 b
	WQhF ₂	1,92 a	0,26 cd	2,93 c	0,41 a	0,13 b	1083,5 a
	Salinidad	*	*	*	*	*	*
	Dosis NPK	*	*	ns	*	*	*
	Interacción	ns	*	*	*	ns	ns
Total parte aérea ¹	WQmF ₁	1,50 d	0,34 b	2,33 c	0,94 c	0,31 d	1260,7 c
	WQmF ₂	1,58 c	0,36 a	2,56 a	1,34 b	0,40 c	1586,4 b
	WQmF ₃	1,80 b	0,35 ab	2,51 a	1,64 a	0,51 b	2161,8 a
	WQhF ₁	1,52 cd	0,30 c	2,45 ab	1,33 b	0,72 a	1497,0 b
	WQhF ₂	1,74 b	0,34 b	2,34 bc	1,47 ab	0,72 a	1962,5 a
	WQhF ₂	1,94 a	0,36 a	2,54 a	1,35 b	0,64 a	2130,0 a
	Salinidad	*	*	ns	ns	*	*
	Dosis NPK	*	*	*	*	ns	*
	Interacción	*	*	*	*	*	ns

¹ Incluye hoja, tallo, fruto, fruto en formación y poda

* Significativo $p \leq 0,05$; ns. No significativo. Letras distintas en una misma columna indican diferencias significativas entre tratamientos utilizando el test de comparación de medias LSD (mínima diferencia significativa) a $p \leq 0,05$.

Anexo 1. Concentración de Nutrientes en la Planta

Tabla A1.4. Concentración de macronutrientes (% sobre materia seca) y materia seca (g m^{-2}) de los órganos aéreos y total de la parte aérea (hoja, tallo, fruto y total) obtenidos en el cultivo de pimiento (hoja, tallo, fruto y total). GW: Agua subterránea; RW: Agua regenerada.

Tratamiento		N	P	K	Ca	Mg	MS
		% s.m.s.					g m^{-2}
Hoja	GW	3,32 a	0,13 b	4,26 a	3,24 a	1,22 a	145,8 c
	RW	3,35 a	0,13 b	4,22 a	3,20 a	1,22 a	172,1 b
	RW N ₁ K ₁	3,49 a	0,12 b	4,22 a	3,40 a	1,30 a	175,3 b
	RW N ₁ K _{1,5}	3,42 a	0,13 b	4,37 a	3,17 a	1,25 a	203,8 a
	RW N _{1,5} K ₁	3,28 a	0,12 b	4,16 a	3,22 a	1,36 a	210,5 a
	RW N _{1,5} K _{1,5}	3,78 a	0,16 a	4,29 a	3,02 a	1,34 a	193,6 ab
Tallo	GW	1,98 a	0,12 a	2,99 a	1,15 a	0,84 ab	85,5 b
	RW	2,04 a	0,13 a	3,15 a	1,15 a	0,81 abc	104,8 a
	RW N ₁ K ₁	2,04 a	0,12 a	3,22 a	1,09 a	0,82 abc	106,5 a
	RW N ₁ K _{1,5}	2,07 a	0,12 a	3,20 a	1,04 a	0,77 c	111,9 a
	RW N _{1,5} K ₁	2,28 a	0,13 a	2,94 a	1,03 a	0,85 a	111,2 a
	RW N _{1,5} K _{1,5}	2,07 a	0,13 a	3,01 a	0,95 a	0,78 bc	117,2 a
Fruto	GW	2,28 b	0,12 bc	3,27 a	0,24 b	0,14 a	233,5 d
	RW	2,31 b	0,11 c	3,37 a	0,22 b	0,14 a	270,2 cd
	RW N ₁ K ₁	2,32 b	0,14 a	3,31 a	0,25 b	0,13 a	320,7 b
	RW N ₁ K _{1,5}	2,28 b	0,13 ab	3,42 a	0,25 b	0,13 a	373,2 a
	RW N _{1,5} K ₁	2,15 c	0,14 a	3,23 a	0,22 b	0,13 a	384,2 a
	RW N _{1,5} K _{1,5}	2,26 b	0,13 ab	3,33 a	0,24 b	0,13 a	391,3 a
Total parte aérea ¹	GW	2,53 a	0,12 b	3,51 a	1,54 a	0,74 a	547,7 d
	RW	2,57 a	0,12 b	3,58 a	1,52 a	0,72 a	628,3 c
	RW N ₁ K ₁	2,62 a	0,12 b	3,59 a	1,58 a	0,75 a	669,7 c
	RW N ₁ K _{1,5}	2,59 a	0,13 b	3,66 a	1,49 a	0,72 a	751,5 b
	RW N _{1,5} K ₁	2,57 a	0,13 b	3,44 a	1,49 a	0,78 a	763,9 ab
	RW N _{1,5} K _{1,5}	2,70 a	0,14 a	3,54 a	1,40 a	0,75 a	821,8 a

¹ Incluye hoja, tallo, fruto, fruto en formación y poda

* Significativo $p \leq 0,05$; ns. No significativo. Letras distintas en una misma columna indican diferencias significativas entre tratamientos utilizando el test de comparación de medias LSD (mínima diferencia significativa) a $p \leq 0,05$.

Tabla A1.5. Concentración de macronutrientes (% sobre materia seca) y materia seca (g m^{-2}) de los órganos aéreos y total de la parte aérea (hoja, tallo, fruto y total) obtenidos en el cultivo de judía (hoja, tallo, fruto y total). DUW: Agua regenerada.

Tratamiento		N	P	K	Ca	Mg	MS
		% s.m.s.					g m^{-2}
Hoja	F _{DUW}	1,83 b	0,14 a	1,26 b	5,03 a	0,83 a	173,7 a
	F _{NK}	2,03 a	0,17 a	1,79 a	4,49 b	0,78 a	173,8 a
	F _{1,5NK}	2,00 a	0,18 a	1,89 a	4,32 b	0,64 b	187,9 a
Tallo	F _{DUW}	1,06 b	0,11 b	1,60 b	2,10 a	0,77 a	107,9 a
	F _{NK}	1,28 a	0,18 a	1,95 a	1,37 b	0,67 a	120,3 a
	F _{1,5NK}	1,22 a	0,12 b	1,87 a	1,24 b	0,53 b	138,1 a
Fruto	F _{DUW}	2,15 c	0,27 b	1,83 b	0,62 b	0,31 b	90,6 b
	F _{NK}	2,36 a	0,37 a	2,48 a	0,74 a	0,35 a	97,5 a
	F _{1,5NK}	2,26 b	0,31 ab	2,77 a	0,75 a	0,33 ab	70,2 c
Total parte aérea ¹	F _{DUW}	1,74 b	0,16 b	1,54 b	2,74 a	0,64 a	408,4 a
	F _{NK}	1,90 a	0,22 a	1,98 a	2,51 b	0,60 a	425,3 a
	F _{1,5NK}	1,82 a	0,17 b	2,00 a	2,30 c	0,52 b	445,0 a

¹ Incluye hoja, tallo, fruto, fruto en formación y poda

* Significativo $p \leq 0,05$; ns. No significativo. Letras distintas en una misma columna indican diferencias significativas entre tratamientos utilizando el test de comparación de medias LSD (mínima diferencia significativa) a $p \leq 0,05$.

ANEXO 2

Eficiencia de Uso de Nutrientes

Tabla A2.1. Eficiencia de uso de N y K en cultivo de melón. Experimento 1. MS: Agua de salinidad media; HS: Agua de salinidad elevada

	EMA (%)			EA (kg kg ⁻¹)			EB (kg kg ⁻¹)			ER (kg kg ⁻¹)			EP (%)		
	N	K		N	K		N	K		N	K		N	K	
<i>Experimento 1</i>															
Dosis NK	*	**		***	***		***	***		***	***		***	***	
F ₁	44,2a	56,7a		257,7a	159,7a		35,4a	21,9a		577,4a	278,9a		57,5b	54,0a	
F ₂	38,0b	44,6b		194,6b	120,6b		26,9b	16,6b		514,1b	274,2a		62,2a	55,2a	
F ₃	39,7b	47,4b		184,0b	114,0b		26,8b	16,6b		470,2c	249,4b		54,8b	44,9b	
Salinidad	ns	**		*	*		ns	ns		**	***		*	ns	
MS	41,4	53,8 ^a		205,2b	127,2b		28,9	17,9		497,8b	236,8b		57,0	49,4b	
HS	39,8	45,3b		219,0a	135,7a		30,5	18,9		543,3a	298,2a		58,9	52,3a	
Interacción	**	**		***	***		*	*		***	ns		*	*	
MS-F ₁	42,6ab	53,4a		219,3b	135,9b		32,8b	20,3b		509,7bc	253,0bc		55,8bc	48,1b	
MS-F ₂	36,4bc	50,3a		200,5b	124,3b		26,4c	16,3c		551,5b	247,6c		59,8b	52,7ab	
MS-F ₃	45,4a	57,8a		195,7b	121,3b		27,6c	17,1c		432,3d	209,9d		55,5c	47,4b	
HS-F ₁	45,7a	60,0a		296,1a	183,5a		38,0a	23,5a		645,1a	304,7a		58,2bc	57,8a	
HS-F ₂	39,6abc	38,8b		188,6b	116,9b		27,3c	16,9c		476,7cd	300,8a		64,6a	56,8a	
HS-F ₃	34,0c	37,0b		172,3b	106,8b		26,1c	16,2c		508,0bc	289,0ab		54,0c	42,4c	

* Significativo p≤0,05; ** Significativo p≤0,01; *** Significativo p≤0,001; ns. No significativo. Letras distintas en una misma columna indican diferencias significativas entre tratamientos utilizando el test de comparación de medias LSD (mínima diferencia significativa) a p≤0,05.
 EMA: Eficiencia Medio Ambiental, expresa el porcentaje de nutriente absorbido por la parte aérea de la planta con respecto al aplicado en fertirrigación. EA: Eficiencia Agronómica, refleja los kg de fruto producido por kg de nutriente aplicado. EB: Eficiencia de Biomasa, muestra los kg de materia seca aérea producidos por la planta por kg de nutriente aplicado. ER: Eficiencia de Rendimiento, expresa los kg de fruto producidos por kg de nutriente absorbido por la parte aérea de la planta. EP: Eficiencia Productiva, expresa el porcentaje de nutriente absorbido por el fruto en relación al total absorbido por la parte aérea de la planta.

Tabla A2.2. Eficiencia de uso de N y K en cultivo de melón. Experimento 2. MS: Agua de salinidad media; HS: Agua de salinidad elevada

	EMA (%)		EA (kg kg ⁻¹)		EB (kg kg ⁻¹)		ER (kg kg ⁻¹)		EP (%)	
	N	K	N	K	N	K	N	K	N	K
Dosis NK	**	ns	***	***	*	**	***	***	***	***
F ₂	52,2b	58,5	189,8a	117,6a	39,4a	24,4a	367,4a	201,2a	60,1a	73,5a
F ₄	65,1a	54,6	197,6a	102,0b	39,7a	20,5b	307,8b	187,7a	59,6a	68,8b
F ₅	63,3a	52,6	153,9b	78,0c	34,3b	17,4c	246,2c	148,5b	55,4b	64,9c
Salinidad	***	ns	ns	ns	ns	ns	***	ns	ns	***
MS	53,8b	53,7	180,8	99,4	37,5	20,6	339,9a	184,3	58,9	67,2a
HS	66,7a	56,8	180,0	99,1	38,1	21,0	274,4b	174,0	57,9	70,8b
Interacción	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
MS-F ₂	46,6	56,8	188,5	116,8	38,2	23,7	404,0	205,2	59,7	72,7
MS-F ₄	58,9	53,3	200,5	103,6	40,2	20,8	341,7	194,6	59,7	66,4
MS-F ₅	56,0	50,8	153,5	77,8	34,2	17,3	274,0	153,0	57,4	62,7
HS-F ₂	57,9	60,1	191,1	118,4	40,6	25,2	330,8	197,1	60,4	74,2
HS-F ₄	71,4	56,0	194,7	100,5	39,2	20,2	273,9	180,9	59,6	71,3
HS-F ₅	70,7	54,4	154,4	78,3	34,5	17,5	218,4	144,0	53,7	67,0

* Significativo p≤0,05; ** Significativo p≤0,01; *** Significativo p≤0,001; ns. No significativo. Letras distintas en una misma columna indican diferencias significativas entre tratamientos utilizando el test de comparación de medias LSD (mínima diferencia significativa) a p≤0,05.

EMA: Eficiencia Medio Ambiental, expresa el porcentaje de nutriente absorbido por la parte aérea de la planta con respecto al aplicado en fertirrigación. EA: Eficiencia Agronómica, refleja los kg de fruto producido por kg de nutriente aplicado. EB: Eficiencia de Biomasa, muestra los kg de materia seca aérea producidos por la planta por kg de nutriente aplicado. ER: Eficiencia de Rendimiento, expresa los kg de fruto producidos por kg de nutriente absorbido por la parte aérea de la planta. EP: Eficiencia Productiva, expresa el porcentaje de nutriente absorbido por el fruto en relación al total absorbido por la parte aérea de la planta.

Tabla A2.3. Eficiencia de uso de N, P y K en cultivo de tomate. WQm: Agua de salinidad media; WQh: Agua de salinidad elevada

	EMA (%)			EA (kg kg ⁻¹)			EB (kg kg ⁻¹)			ER (kg kg ⁻¹)			EP (%)		
	N	P	K	N	P	K	N	P	K	N	P	K	N	P	K
Dosis NPK	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***
F ₁	113,4a	160,8a	147,2a	461,8a	3138,5a	378,3a	75,1a	510,7a	61,6a	413,6a	1970,4	261,4ab	48,1	41,9a	59,5ab
F ₂	80,7b	114,6b	96,5b	319,6b	2172,4b	261,9b	48,4b	328,6b	39,6b	406,8a	1909,0	272,9a	50,8	42,5a	62,2a
F ₃	54,6c	70,3c	60,4c	175,1c	1190,4c	143,5c	29,2c	198,7c	23,9c	322,4b	1705,2	238,0b	46,9	35,9b	54,8b
Salinidad Agua	**	ns	*	ns	ns	ns	*	*	*	**	ns	*	ns	**	ns
WQm	74,8b	110,8	94,0b	318,9	2167,2	261,2	47,1b	320,3b	38,6b	417,9a	1931,4	272,7a	48,4	43,3a	57,6
WQh	91,0a	119,7	108,7a	318,9	2167,0	261,2	54,7a	371,7a	44,8a	344,0b	1791,7	242,1b	48,9	36,9b	60,1
Interacción	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	*	*
WQmF ₁	103,2	156,3	131,0	459,3	3121,5	376,3	68,7	466,9	56,3	449,3	2008,7	288,6	47,1bc	45,2a	59,1a
WQmF ₂	68,3	106,5	90,5	322,6	2192,2	264,2	43,2	293,8	35,4	473,0	2063,4	292,2	54,8a	49,7a	63,0a
WQmF ₃	53,0	69,5	60,5	174,8	1187,8	143,2	29,5	200,2	24,1	331,3	1722,1	237,2	43,2c	35,0b	50,8b
WQhF ₁	123,6	165,3	163,4	464,3	3155,6	380,4	81,6	554,5	66,8	377,9	1932,2	234,1	49,1abc	38,6b	59,9a
WQhF ₂	93,1	122,8	102,4	316,7	2152,6	259,5	53,5	363,4	43,8	340,7	1754,6	253,5	46,9bc	35,4b	61,4a
WQhF ₃	56,2	71,0	60,3	175,5	1193,0	143,8	29,0	197,2	23,8	313,5	1688,3	238,7	50,7ab	36,8b	58,9a

* Significativo p≤0,05; ** Significativo p≤0,01; *** Significativo p≤0,001; ns. No significativo. Letras distintas en una misma columna indican diferencias significativas entre tratamientos utilizando el test de comparación de medias LSD (mínima diferencia significativa) a p≤0,05.

EMA: Eficiencia Medio Ambiental, expresa el porcentaje de nutriente absorbido por la parte aérea de la planta con respecto al aplicado en fertirrigación. EA: Eficiencia Agronómica, refleja los kg de fruto producido por kg de nutriente aplicado. EB: Eficiencia de Biomasa, muestra los kg de materia seca aérea producidos por la planta por kg de nutriente aplicado. ER: Eficiencia de Rendimiento, expresa los kg de fruto producidos por kg de nutriente absorbido por la parte aérea de la planta. EP: Eficiencia Productiva, expresa el porcentaje de nutriente absorbido por el fruto en relación al total absorbido por la parte aérea de la planta.

Tabla A2.4. Eficiencia de uso de N y K en cultivo de pimiento. GW: Agua subterránea; RW: Agua regenerada

	EMA (%)			EA (kg kg ⁻¹)			EB (kg kg ⁻¹)			ER (kg kg ⁻¹)			EP (%)		
	N	K		N	K		N	K		N	K		N	K	
GW	***	***	***	***	***	***	***	***	***	ns	ns	ns	ns	*	*
	1015,5a	3776,2a		2565,8a	6846,1a		407,9a	1088,2a		253,4	181,0		39,1	40,2b	
RW	339,4b	970,3b		851,7b	1740,4b		133,7b	273,2b		251,0	179,5		39,1	40,8b	
RW N ₁ K ₁	136,9c	122,3c		357,4c	231,5c		53,6c	34,7c		261,6	190,0		43,6	45,1a	
RW N ₁ K _{1,5}	101,5c	141,2c		286,2c	278,0c		40,1c	38,9c		281,9	196,8		44,7	46,9a	
RW N _{1,5} K ₁	151,9c	90,4c		431,2c	186,2c		61,1c	26,4c		284,1	206,5		43,4	47,3a	
RW N _{1,5} K _{1,5}	112,5c	98,9c		298,0c	193,0c		43,8c	28,4c		265,3	195,3		41,9	45,5a	

* Significativo p≤0,05; ** Significativo p≤0,01; *** Significativo p≤0,001; ns. No significativo. Letras distintas en una misma columna indican diferencias significativas entre tratamientos utilizando el test de comparación de medias LSD (mínima diferencia significativa) a p≤0,05.

EMA: Eficiencia Medio Ambiental, expresa el porcentaje de nutriente absorbido por la parte aérea de la planta con respecto al aplicado en fertirrigación. EA: Eficiencia Agronómica, refleja los kg de fruto producido por kg de nutriente aplicado. EB: Eficiencia de Biomasa, muestra los kg de materia seca aérea producidos por la planta por kg de nutriente aplicado. ER: Eficiencia de Rendimiento, expresa los kg de fruto producidos por kg de nutriente absorbido por la parte aérea de la planta. EP: Eficiencia Productiva, expresa el porcentaje de nutriente absorbido por el fruto en relación al total absorbido por la parte aérea de la planta.

Tabla A2.5. Eficiencia de uso de N, P y K en cultivo de judía. DUW: Agua regenerada

	EMA (%)		EA (kg kg ⁻¹)		EB (kg kg ⁻¹)		ER (kg kg ⁻¹)		EP (%)	
	N	K	N	K	N	K	N	K	N	K
	***	***	***	***	***	***	ns	ns	*	*
F _{DUW}	151,6a	272,8a	222,9a	455,5a	67,6a	138,2a	152,2	169,7	39,4a	36,9a
F _{NK}	59,5b	64,4b	79,9b	82,9b	24,1b	25,0b	135,6	130,7	37,6a	35,5a
F _{1,5NK}	39,6b	45,3b	42,9b	44,5b	18,4b	19,1b	111,0	99,4	32,8b	32,0b

* Significativo $p \leq 0,05$; ** Significativo $p \leq 0,01$; *** Significativo $p \leq 0,001$; ns. No significativo. Letras distintas en una misma columna indican diferencias significativas entre tratamientos utilizando el test de comparación de medias LSD (mínima diferencia significativa) a $p \leq 0,05$.
 EMA: Eficiencia Medio Ambiental, expresa el porcentaje de nutriente absorbido por la parte aérea de la planta con respecto al aplicado en fertirrigación. EA: Eficiencia Agronómica, refleja los kg de fruto producido por kg de nutriente aplicado. EB: Eficiencia de Biomasa, muestra los kg de materia seca aérea producidos por la planta por kg de nutriente aplicado. ER: Eficiencia de Rendimiento, expresa los kg de fruto producidos por kg de nutriente absorbido por la parte aérea de la planta. EP: Eficiencia Productiva, expresa el porcentaje de nutriente absorbido por el fruto en relación al total absorbido por la parte aérea de la planta.

Con el deseo de que esta Tesis contribuya a mejorar la eficiencia de uso de los fertilizantes y la gestión de los recursos hídricos no convencionales, con las repercusiones ambientales y sociales que esto conlleva

